



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

ESPECIALIZAÇÃO EM GEOPROCESSAMENTO AMBIENTAL

***ESTUDO MINERALÓGICO DE ROCHAS
METAMÓRFICAS DA REGIÃO DE
GUARDA MOR – MG, A PARTIR DE
ESPECTRORRADIOMETRIA DE REFLECTÂNCIA
E IMAGEM ASTER***

ANA PAULA MARTINS RIBEIRO SANTOS

Monografia de conclusão de
curso de Especialização

BRASÍLIA – DF

2013



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

***Estudo Mineralógico de rochas metamórficas da
região de Guarda Mor – MG, a partir de
Espectrorradiometria de Reflectância e Imagem
ASTER***

Ana Paula Martins Ribeiro Santos

Monografia de conclusão de
curso de Especialização

ORIENTADORA: Msc. Thais Andressa Carrino (IG/Unicamp)

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses (IG/UnB)

EXAMINADORES: Prof^a Dr^a Tati de Almeida (IG/UnB)

Dr. Diego Fernando Ducart

BRASÍLIA – DF

2013

***“você são todos aprendizes, fazedores,
professores.”***

(Richard Bach)

*Este trabalho é dedicado essencialmente
aos meus amores: Lolo e Baruque.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus continuamente por tudo!

Aos meus queridos pais Meire e Ribeiro, as minhas irmãs Amanda e Andressa, ao meu sobrinho Marcos Antônio e ao meu esposo Luis Carlos, pelo apoio, compreensão e amor.

À orientadora e amiga Doutoranda Thais Andressa Carrino, pela animação ao discutir e opinar nos temas referentes à minha monografia.

Ao co-orientador Professor Doutor Paulo Roberto Meneses, pelos ensinamentos, carinho e confiança.

Ao funcionário do Laboratório de Sensoriamento e Análises Espaciais do IG/UnB, Sérgio Paulo Brito pela disponibilidade e auxílio incessantemente necessários.

Ao amigo Gabriel Franco pelas notáveis contribuições na proposta do projeto de pesquisa para este curso.

À Débora Matos pela colaboração na atividade pré-campo, fornecendo alguns dados de seu mestrado.

A Darby Lima pelo auxílio com *ArcGis* na elaboração do mapa geológico e de localização da área de estudo desta pesquisa.

A Aureliano Nóbrega pela ajuda com a língua inglesa, tão necessária na preparação do *Abstract*.

A amizade conquistada no decorrer do curso de Especialização em Geoprocessamento Ambiental do Instituto de Geociências - IG/UnB, pelas conversas, almoços e confraternizações, em especial: Letícia Moraes, Bruno Carramaschi, Eveline Sayão, André Rocha, Jussara Costa, Lúcio Carvalho, Gustavo Farhat, André Gonçalves, Caroline Chahini, Will Sandes, Leandro Lino e Vera Nanci.

À Professora Doutora Maria Júlia E. Chelini, pelo incentivo e as liberações do Museu de Geociências - MGeo/UnB.

À Professora Doutora Edi Mendes Guimarães e Laura Brant do Laboratório de Raios-X – IG/UnB, pela amizade e pelas análises de DRX.

Aos coordenadores e aos professores do curso de Especialização em Geoprocessamento Ambiental do Instituto de Geociências - IG/UnB pela oportunidade concedida.

RESUMO

A técnica de espectrorradiometria de reflectância permite a análise da composição química de diferentes materiais, dentre os quais os minerais. Esta técnica foi utilizada neste trabalho para o estudo espectro-mineralógico das rochas metamórficas aflorantes na região de Guarda Mor, Minas Gerais, conjuntamente com análises via difratometria de raios-X. Para esse fim, uma saída de campo foi realizada para obtenção de medidas espectrorradiométricas *in situ* e a coleta de amostras de rochas. O equipamento empregado foi o espectrorradiômetro de alta resolução *FieldSpec3 High-resolution*, da *Analytical Spectral Device* (ASD). Foram amostrados nove pontos de campo, medindo-se em cada, entre 10 e 30 medidas espectrorradiométricas. Seis amostras de rocha foram coletadas para medidas em laboratório que foram efetuadas com o mesmo equipamento das medidas de campo, nas duas faces das amostras, a mais preservada e a intemperizada (oxidada). Em pontos diferentes das faces foram realizadas cinco medidas, com dez leituras cada, perfazendo um total de cem espectros de reflectância por amostra a partir dos quais uma biblioteca espectral das rochas metamórficas foi criada. Para a interpretação visual das curvas espectrais, deu-se prioridade às curvas espectrais obtidas em laboratório, caracterizadas por maior razão sinal/ruído. Foram discriminados muscovita, fengita e caulinita em amostras de filito, metarritmito e quartzito, além de óxidos de ferro (hematita e goethita). A existência de matéria orgânica em algumas faces mais preservadas de amostras como filitos, favoreceu a atenuação das feições de absorção de minerais e/ou a diminuição do albedo das curvas de reflectância. Com base na discriminação dos minerais citados acima, procedeu-se à aplicação da técnica de classificação denominada *Spectral Feature Fitting* (SFF) numa imagem do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*). A presença de solos, amplas áreas agrícolas e vegetação afetou todos os resultados dirigidos ao mapeamento remoto de muscovita, caulinita, fengita e óxidos de ferro. Todavia, em que pese esta limitação da aplicação de técnicas de processamento remoto multiespectral nas condições naturais descritas, conclui-se a notável importância da espectrorradiometria de reflectância para estudos de afloramentos e amostras de rochas pela praticidade, rapidez e pelo fato desta ser uma técnica não destrutiva aplicada ao estudo mineralógico exemplificado neste trabalho.

ABSTRACT

The reflectance spectroradiometry technique allows the chemical analysis of different materials, including minerals. This technique was here applied on a mineralogical study of the outcropping metamorphic rocks of the Guarda Mor area, Minas Gerais. X-Ray analyses were carried out as well. A field trip was taken in order to measure the radiometric response of the rocks in situ and collect samples. The instrument used was a high resolution spectroradiometer FieldSpec3, from Analytical Spectral Device (ASD). Nine spots were sampled, each of them measured at about 10 to 30 times. Six rock samples were collected for lab measurement, considering both the weathered and fresh rock. Measurements were taken on 5 different spots for each rock face, each of them with 10 readings. It sums a total of 100 spectra for each sample, from which a spectral library of the metamorphic rocks was created. The interpretation process took in advantage the lab measured spectra, with a better signal/noise ratio. Muscovite, fengite and kaolinite were observed at phyllite, metamorphosed rhytimite and quartzite, as well as iron oxides (hematite and goethite). The organic matter content on some fresh phyllite samples smoothed some mineral absorption features and/ordecreased the spectral albedo. Based on the discrimination of the above mentioned minerals, the Spectral Feature Fitting (SFF) technique was applied in ASTER image (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*). The presence of soil, plantation and vegetation had effect on all results directed to the remote mapping of muscovite, kaolinite, fengite and iron oxides. However, even taking into consideration the limitation of the use of the digital processing technique in this case study, it is remarkable the importance of the reflectance spectroradiometry for outcrop and hand samples studies considering its practical, fast and non-destructive characteristics, such as exemplified in the mineralogical approach of this work.

SUMÁRIO

1 - Introdução	10
1.1 Contextualização da pesquisa	10
1.2 Objetivos	10
1.3 Contextualização geológica	12
2 - Materiais e Métodos	13
2.1 Atividade de campo	13
2.2 Atividade em laboratório	14
2.3 Sensor ASTER	16
2.4 Classificador <i>Spectral Feature Fitting</i> (SFF)	17
3 - Resultados e Discussões	18
3.1 Criação da biblioteca espectral	18
3.2 Análise mineralógica por espectrorradiometria de reflectância e DRX	19
3.2.1 Amostra AP1	19
3.2.2 Amostra AP2	22
3.2.3 Amostra AP6	24
3.2.4 Amostra AP7	26
3.2.5 Amostra AP8	28
3.2.6 Amostra PT10	30
3.2.7 Amostras com medidas espectrorradiométricas em campo	32
3.2.8 Discussões	33
3.3 Processamento de imagem ASTER	35
3.3.1 Espectros de referência	35
3.3.2 Aplicação do classificador SFF	37
4 - Conclusão	39
Referências Bibliográficas	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa Geológico e de localização da região de Guarda Mor–MG. Modificado do mapa e carta geológica Folha SE.23-V-C-V-Guarda-Mor. Escala: 1:100.000. (Tuller <i>et al</i> , 2013)	11
Figura - 2: Coluna estratigráfica referente ao Grupo Canastra, definida no noroeste de Minas Gerais (Dardenne, 2000)	12
Figura 3 – A - Espectrorradiômetro <i>FieldSpec 3 High-resolution</i> da ASD, com indicação da configuração usada para as medições espectrais em laboratório. B - Esquema ilustrando os principais componentes internos do espectrorradiômetro e da sonda manual (Modificado de Kerr <i>et al</i> , 2011). SWIR: infravermelho de ondas curtas, VNIR: visível a infravermelho próximo	15
Figura 4 - A - Afloramento de filito do ponto AP1. B - Medidas espectrorradiométricas da porção oxidada (AP1 080 e AP1 090) e da porção mais preservada (AP1 000 e AP1 020). C, D – Destaque da região do infravermelho de ondas curtas, marcado pelo pico de reflectância em 2184 nm e pelas feições de absorção em ~2166 e ~2208 nm, e em ~2349 e ~2438 nm, características da caulinita e da muscovita respectivamente	20
Figura 5 – Difratoograma da amostra AP1	21
Figura 6 – A - Afloramento de quartzito e detalhe da amostra coletada no ponto AP2. B - Medidas espectrorradiométricas da porção oxidada (AP2 040) e a mais preservada (AP2 090)	23
Figura 7 – Difratoograma da amostra AP2	24
Figura 8 – A - Amostra de quartzito milonitizado do ponto AP6. B - Medidas espectrorradiométricas da porção mais preservada (AP6 048) e da oxidada (AP6 078). C – Destaque da região do infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas	25
Figura 9 – Difratoograma da amostra AP6	26
Figura 10 – A - Amostra de metarritmito do ponto AP7. B - Medidas espectrorradiométricas das porções oxidada (AP7 011) e mais preservada (AP7 071). C – Destaque da região do infravermelho de ondas curtas, das feições de absorção em ~2166 e ~2208 nm e do pico de reflectância em 2181 nm típicos da caulinita, e ~2349 e ~2438 nm, características da muscovita	27
Figura 11 – Difratoograma da amostra AP7	28
Figura 12 – A - Aspecto do filito carbonoso em afloramento, ponto AP8. B - Curvas espectrais com a reflectância variando de 0 a 1. C - Curvas espectrais representativas deste filito, considerando-se a porção oxidada (AP8 051) e a mais preservada (AP8 001). D – Destaque da região do visível ao infravermelho próximo. E – Destaque da região do infravermelho de ondas curtas	29
Figura 13 – Difratoograma da amostra AP8	30
Figura 14 – A - Amostra de metapelito intercalado por quartzitos no ponto PT10. B – Curvas espectrais com a reflectância variando de 0 a 1. C - Medidas espectrorradiométricas relativas as porções mais preservada (PT10 021) e oxidada (PT10 051)	31

Figura 15 – Difratoograma da amostra PT10	32
Figura 16 – A - Exemplo do ambiente de medições espectrais nos pontos, AP3, AP4 e AP5, caracterizado por fragmentos de filito e campo natural. B - Curvas espectrais representativas deste filito em cada ponto. C – Destaque às regiões do visível ao infravermelho próximo. D – Destaque à região do infravermelho de ondas curta	33
Figura 17 – A – Espectros de laboratório; onde AP1 080 é o espectro representativo da muscovita (musc) e hematita (hem), AP8 001 da fengita (feng) e hematita (hem) e AP2 040 da caulinita (caul) e goethita (goet); reamostrados para a resolução espectral do sensor ASTER. B – Espectros puros da biblioteca espectral do <i>USGS</i> reamostrados para resolução espectral do sensor ASTER. C e D - Destaque à região do infravermelho de ondas curtas	36
Figura 18 - Resultado da razão <i>Scale/RMS</i> (imagem <i>FIT</i>) do processamento SFF. As regiões que se concentram os pixels brancos predizem a alta probabilidade dos seguintes alvos investigados: A – fengita; B – muscovita; C – caulinita; D – hematita; E – goethita	38

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição geral das amostras coletadas. ER_c – espectrorradiometria de reflectância em campo, ER_l – espectrorradiometria de reflectância em laboratório e DRX – Difractometria de raios-X	16
Tabela 2 - Características dos subsistemas VNIR, SWIR e TIR do sensor ASTER (Abrams <i>et al</i> , 2002)	17
Tabela 3 - Composição mineral das amostras determinada por DRX. M – constituinte maior, m – constituinte menor, tr – constituinte traço	21
Tabela 4 – Posição central das bandas de absorção dos alvos discriminados	34

1 – Introdução

1.1 - Contextualização da pesquisa

De acordo com Meneses (2012), sensoriamento remoto é a ciência que estuda os processos de aprimoramento da obtenção e análise de imagens da Terra pela detecção e medição quantitativa das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres.

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto multi e hiperespectrais para a discriminação de materiais está baseada nas diferenças existentes entre os comportamentos espectrais da reflectância, emitância e espalhamento da energia eletromagnética pelos objetos (Pontual *et al*, 1997; Pontara, 1998).

No presente trabalho o sensoriamento remoto foi utilizado na intenção de identificar as respostas espectrais de minerais e rochas por espectrorradiometria de reflectância e processamento de imagem do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*).

A área selecionada para este estudo está localizada no noroeste do estado de Minas Gerais, na região do município de Guarda Mor (Figura 1), e é caracterizada por rochas metamórficas de baixo grau pertencentes à porção sul da Faixa de Dobramentos Brasília. De acordo Hunt & Sulisbury (1976), as rochas metamórficas apresentam respostas espectrais notáveis e diferentes das demais rochas, pois devido a sua natureza mais cristalina, os minerais constituintes produzem feições de absorção bem definidas.

1.2 – Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo o estudo espectro-mineralógico de rochas metamórficas de baixo grau da região de Guarda Mor, Minas Gerais, usando técnicas de laboratório de espectrorradiometria de reflectância balizada por difratometria de raios-X e o mapeamento espectral a partir de imagens do sensor ASTER com o intuito de averiguar a potencialidade destas técnicas na discriminação litológica.

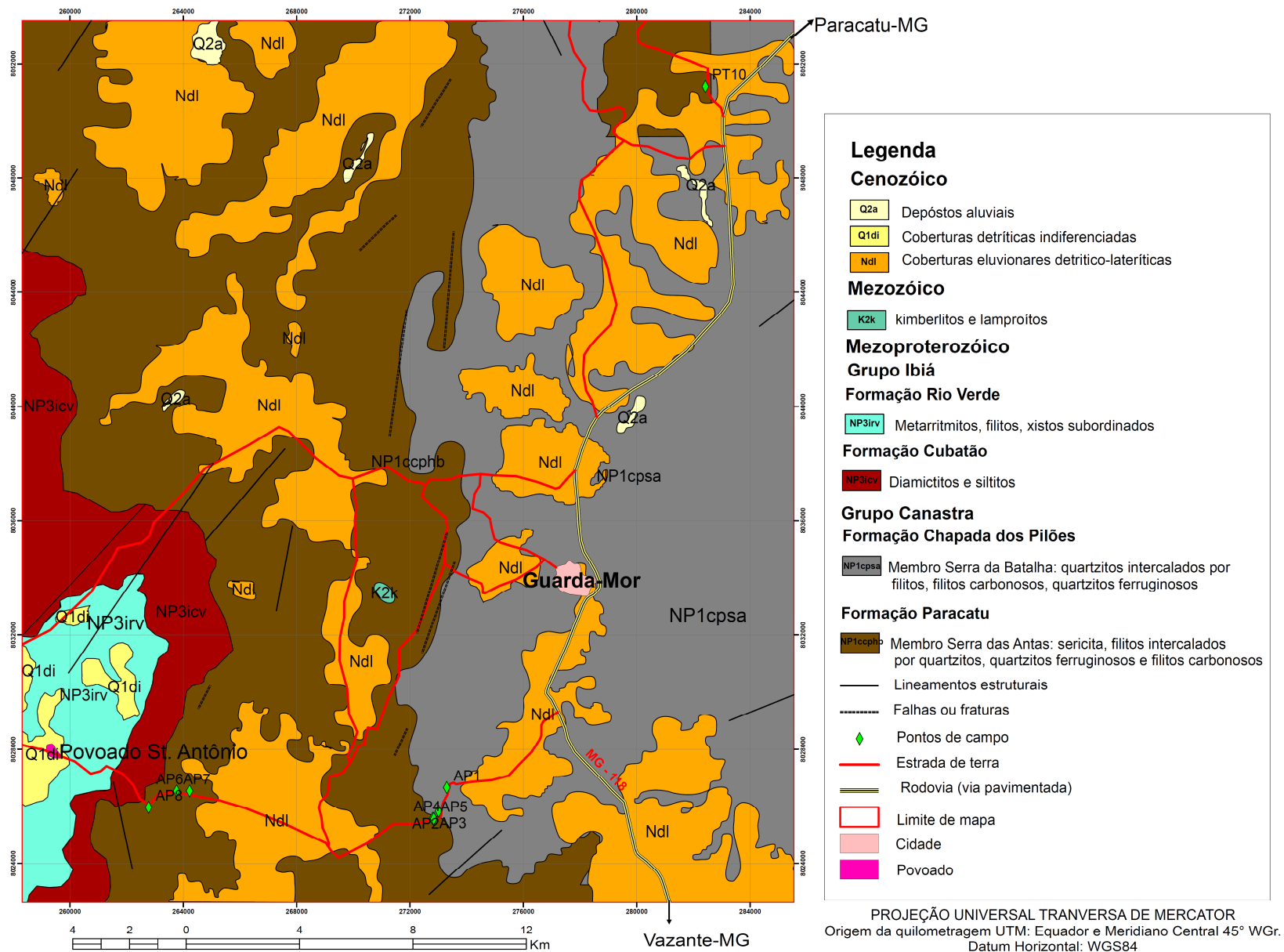


Figura 1 - Mapa geológico e de localização da região de Guarda Mor, Minas Gerais. Modificado do mapa e carta geológica Folha SE.23-V-C-V-Guarda-Mor. Escala: 1:100.000 (Tuller *et al*, 2013).

1.3 - Contextualização geológica

A área de estudo é caracterizada por rochas do Grupo Canastra, que afloram por toda a porção sul da Faixa de Dobramentos Brasília, desde o sudeste de Minas Gerais até a região sudeste de Goiás e Distrito Federal (Freitas-Silva, 1996).

O Grupo Canastra é subdividido nas formações Serra do Landim, Paracatu e Chapada dos Pilões (Figura 2). A Formação Paracatu comporta os membros Morro do Ouro e Serra da Anta, enquanto a Formação Chapada dos Pilões se caracteriza pelos membros Serra da Urucânia e Serra da Batalha (Freitas-Silva & Dardenne, 1994; Freitas-Silva, 1996).

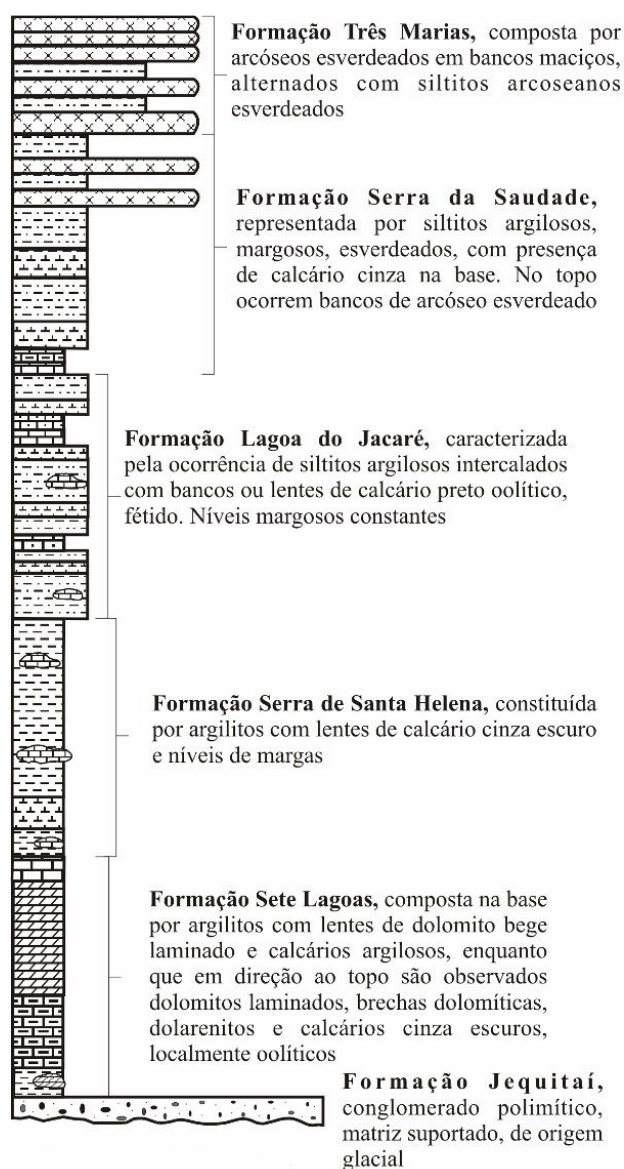


Figura 2 - Coluna estratigráfica referente ao Grupo Canastra, definida no noroeste de Minas Gerais (Dardenne, 2000).

Na área de estudo afloram rochas do Grupo Canastra, pertencentes ao Membro Serra da Batalha que é constituído, em geral, por quartzitos brancos, de granulometria fina a média, bandados, sericíticos, intercalados por filitos sericíticos e carbonosos, e quartzitos ferruginosos. Também ocorrem rochas pertencentes ao Membro Serra da Anta, composto por filitos sericíticos cinza a cinza esverdeados, prateados, intercalados por quartzitos, quartzitos ferruginosos e filitos carbonosos, além de metarritmitos, filitos e xistos subordinados da Formação Rio Verde, e diamictitos e siltitos da Formação Cubatão, ambas do Grupo Ibiá (Tuller *et al*, 2013).

2 - Materiais e Métodos

2.1 - Atividade de campo

A atividade de campo foi realizada entre os dias 27 e 29 de agosto de 2013, com o intuito de obter medidas espectrorradiométricas *in situ* e coletar amostras de rochas na região do município de Guarda Mor.

Segundo Meneses (2001), a função da espectrorradiometria de reflectância é medir, em diferentes comprimentos de onda, a energia eletromagnética refletida pelos objetos e representar em gráficos as curvas de reflectância espectral.

A reflectância consiste na “razão do fluxo radiante refletido por uma superfície amostral pelo fluxo radiante refletido por uma superfície lambertiana, sendo ambos irradiados nas mesmas condições de iluminação e geometria” (Nicodemos *et al*, 1977).

É controlada por fatores que são conduzidos pelas interações macroscópicas e microscópicas da radiação eletromagnética com os alvos, determinando o comportamento da reflectância do material (Meneses, 2001). As curvas de reflectância podem fornecer, por exemplo, informações sobre a composição físico-químico e mineralógica das rochas (Swain & Davis, 1978).

O equipamento usado para as leituras de campo foi o espectrorradiômetro de alta resolução *FieldSpec3 High-resolution*, da *Analytical Spectral Device* (ASD), cedido pelo Laboratório de Sensoriamento e Análises Espaciais do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB). Este espectrorradiômetro se caracteriza por um conjunto de detectores de silício na faixa de 350 a 1050 nm e outros dois conjuntos de detectores de

InGaAs relacionados com o intervalo espectral de 1050 a 2500 nm. O intervalo amostral compreende 1,4 nm na faixa de 350 a 1000 nm e 2,0 nm na faixa de 1000 a 2500 nm, totalizando 2150 canais espectrais. As resoluções espectrais são dadas em função da largura à meia altura (*FWHM*) e compreendem 3 nm em cerca de 700 nm, e entre 10 e 12 nm na faixa de 1000 a 2500 nm.

Para este estudo foi usada uma sonda manual (*light probe*) que contém uma lâmpada halógena. Um cabo de fibra ótica é conectado ao espectrorradiômetro e à sonda, levando a radiação refletida até os três conjuntos de detectores (Figura 3). A área medida por este espectrorradiômetro é caracterizada por um círculo de diâmetro de 2 cm.

Ao todo nove pontos de campo foram amostrados, medindo-se em cada afloramento, entre 10 e 30 medidas espectrorradiométricas. Destes nove pontos de campo apenas seis foram amostrados quanto à coleta de rochas para medidas em laboratório, conforme consta na Tabela 1.

Antes da realização das medidas espectrais das rochas foi realizado o procedimento de calibração do espectrorradiômetro a partir de medidas espectrais da placa *Spectralon®* da *Labsphere Inc.* Esta placa é constituída por politetrafluoretileno e halon sinterizado e se comporta como um corpo lambertiano, pois se caracteriza por uma refletividade muito próxima a 100% na faixa espectral de 350 a 2500 nm, que é uniforme em todas as direções.

2.2 – Atividade em laboratório

As amostras coletadas em campo foram limpas, rotuladas e posteriormente submetidas a medidas espectrorradiométricas utilizando o espectrorradiômetro *FieldSpec3 High-resolution*, similarmente aos procedimentos realizados em campo quanto à calibração com a placa *Spectralon®*. Estas medidas foram realizadas no Laboratório de Sensoriamento e Análises Espaciais do IG/UnB.

As medições espectrorradiométricas foram feitas em duas faces, a mais preservada e a intemperizada (oxidada), onde se estabeleceram cinco medidas em pontos diferentes das faces com 10 leituras cada, perfazendo um total de 100 espectros de reflectância por amostra.

Para complementar os resultados obtidos a partir da técnica de espectrorradiometria de reflectância, foram realizadas análises mineralógicas por difratometria de raios-X (DRX).

A DRX permite a caracterização das estruturas cristalinas através dos planos dos cristais (“d”) e, desta forma, a identificação dos minerais (Brindley, 1980; Moore & Reynolds, 1989).

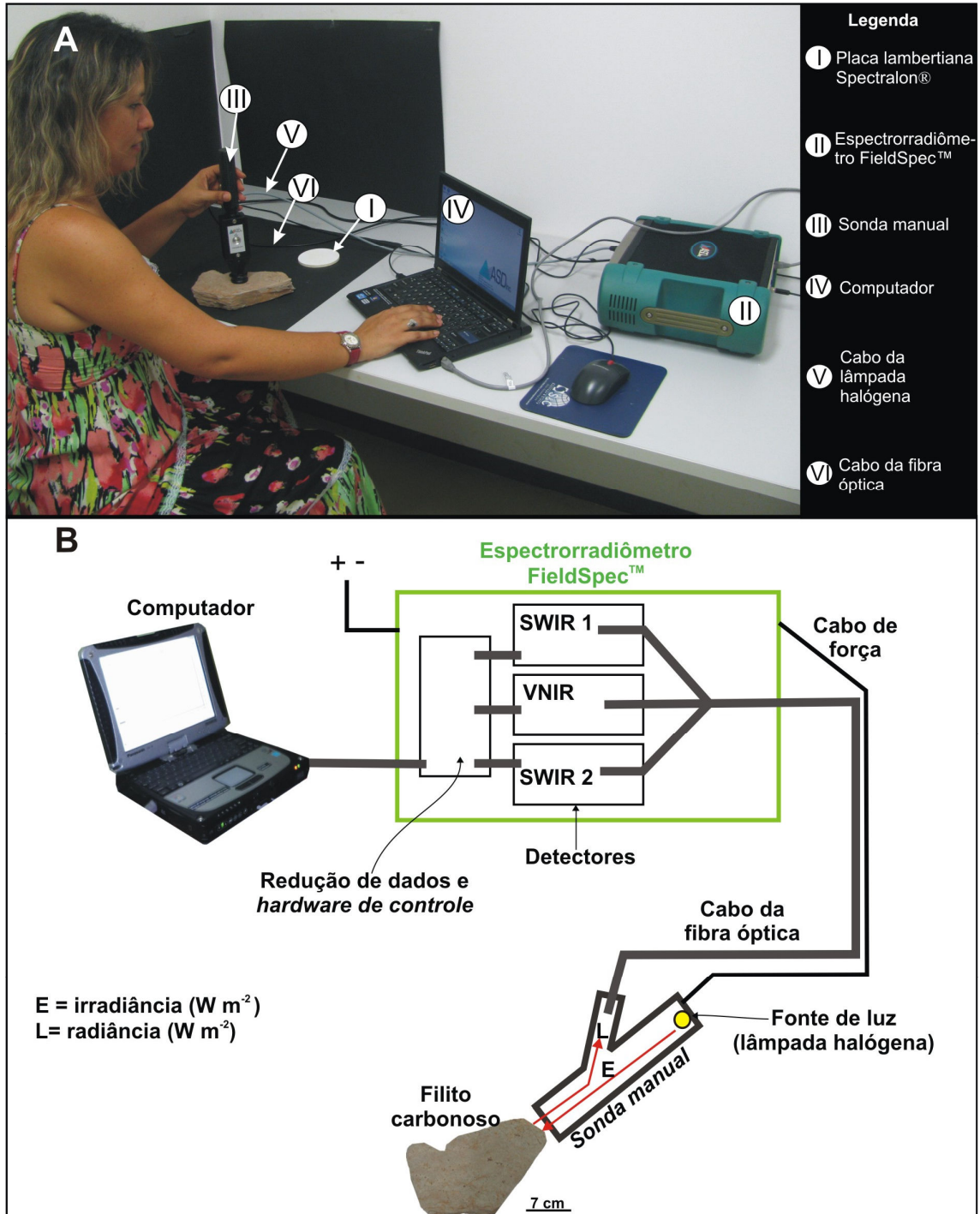


Figura 3 – **A** - Espectrorradiômetro *FieldSpec 3 High-resolution* da ASD, com indicação da configuração usada para as medições espectrais em laboratório. **B** - Esquema ilustrando os principais componentes internos do espectrorradiômetro e da sonda manual (Modificado de Kerr *et al*, 2011). SWIR: infravermelho de ondas curtas, VNIR: visível a infravermelho próximo.

Tabela 1- Descrição geral das amostras coletadas. ER_c – espectrorradiometria de reflectância em campo, ER_l – espectrorradiometria de reflectância em laboratório e DRX – difratometria de raios-X.

Amostra	Descrição	Coordenada UTM (zona 23)	Altitude (metros)	ER _c	ER _l	DRX
AP1	Filito intercalado por níveis argilosos e arenosos	8026651 N, 273300 E	809	X	X	X
AP2	Quartzito	8025816 N, 273010 E	880		X	X
AP3	Filito	8025565 N, 272795 E	922	X		
AP4	Filito	8025572 N, 272844 E	916	X		
AP5	Filito	8025557 N, 272840 E	800	X		
AP6	Quartzito milonitizado	8026530 N, 264225 E	942	X	X	X
AP7	Metarritmito	8026528 N, 263761 E	935	X	X	X
AP8	Filito carbonoso	8025951 N, 262779 E	912	X	X	X
PT10	Metapelito intercalado por quartzitos	8051199 N, 282423 E	690		X	X

Para as análises em rocha total utilizou-se a amostra pulverizada e compactada a seco sobre lâmina de vidro, procedimento realizado no Laboratório de Raios-X do IG/UnB com o equipamento RIGAKU, modelo ULTIMA IV. Este equipamento opera com tubo de cobre com filtro de níquel em 35 kV e 15 mA, velocidade de varredura de 5°/minuto, e passos de 0,05° no intervalo de 2θ equivalente a 2° a 80°. A identificação dos minerais foi feita com o auxílio do programa JADE 9.0, base WINDOWS, empregando-se o banco de dados PC-PDF produzido pelo *International Center for Diffraction Data* (ICDD). A abundância mineralógica relativa foi feita pela comparação das intensidades das reflexões dos picos característicos de cada mineral.

2.3 - Sensor ASTER

O sensor ASTER é um dos instrumentos a bordo do satélite TERRA (EOS - AM1) em funcionamento desde 1999. É constituído por três subsistemas de sensores: VNIR (*Visible and Near Infrared*), SWIR (*Shortwave Infrared*) e TIR (*Thermal Infrared*). As imagens

ASTER apresentam catorze bandas espectrais e suas principais características constam na Tabela 2.

Neste trabalho foi utilizada uma imagem de sensor ASTER de 23 de abril de 2001, para a aplicação da técnica de processamento digital denominada *Spectral Feature Fitting* (SFF) com as nove bandas da região do visível ao infravermelho de ondas curtas.

Tabela 2 - Características dos subsistemas VNIR, SWIR e TIR do sensor ASTER (Abrams *et al*, 2002).

Subsistema	Banda espectral	Faixa espectral (μm)	Resolução espectral	Uso na pesquisa
VNIR	1	0.520 – 0.600	15 m	Sim
	2	0.630 – 0.690		Sim
	3N	0.780 – 0.860		Sim
	3B	0.780 – 0.860		Sim
SWIR	4	1.600 – 1.700	30 m	Sim
	5	2.145 – 2.185		Sim
	6	2.185 – 2.225		Sim
	7	2.235 – 2.285		Sim
	8	2.295 – 2.365		Sim
	9	2.360 – 2.430		Sim
TIR	10	8.125 – 8.475	90 m	Não
	11	8.475 – 8.825		Não
	12	8.925 – 9.275		Não
	13	10.250 – 10.950		Não
	14	10.950 – 11.650		Não

2.4 - Classificador *Spectral Feature Fitting* (SFF)

O fundamento da classificação espectral das imagens de sensoriamento remoto é a comparação entre a imagem (espectros dos pixels de composição desconhecida) e uma biblioteca espectral (espectros dos materiais de referência) (Borengasser *et al*, 2008).

O método de classificação utilizado neste trabalho para o mapeamento espectro-mineralógico foi o *Spectral Feature Fitting* (SFF) que, inicialmente, foi desenvolvido para aplicação em dados hiperespectrais e, posteriormente, estendido para dados multiespectrais, incluindo dados do sensor ASTER.

O SFF é um classificador baseado na análise de diversos materiais selecionados a partir de espectros de referência (*endmembers*). O contínuo dos pixels da imagem e dos espectros de referência é removido e em seguida cada espectro é comparado com o espectro

desconhecido da imagem utilizando um algoritmo por mínimos quadrados, produzindo-se, respectivamente, uma imagem denominada *Scale* e outra chamada RMS (*Root Mean Square*). A imagem *Scale* indica o melhor ajuste do espectro de referência em relação ao pixel da imagem, representando a maior probabilidade de se encontrar o alvo desejado por meio de pixels mais claro na imagem resultante. Complementarmente, para cada imagem *Scale* gerada, uma imagem de erro associado a este processo de classificação também é produzida (RMS), sendo que um baixo erro é representado por meio de pixels escuros. A probabilidade do mapeamento dos alvos pode ser aprimorada a partir da divisão, pixel-a-pixel, da imagem *Scale* pela imagem RMS (imagem *FIT*), de forma a normalizar o resultado. Desta forma, pixels mais claros passam a designar as maiores chances de se encontrar o *endmember* estudado (Clark *et al*, 1990).

3 - Resultados e Discussões

3.1 - Criação da biblioteca espectral

De acordo com Lobo (2009), uma biblioteca espectral é um conjunto de curvas espectrais de referência que representam alvos, objetos ou estados dos materiais.

As bibliotecas espectrais contêm uma quantidade de espectros que são obtidos a partir de medidas adquiridas em campo e/ou em laboratórios, ou mesmo pela extração de “pixels puros” em imagens. Os *softwares* de processamento de dados apresentam módulos de construção e processamento de bibliotecas espectrais, sendo este um procedimento simples em que os espectros são inseridos a partir de arquivos ASCII ou em texto sem formatações especiais (Baptista, 2012).

Neste trabalho, foi criada uma biblioteca espectral de rochas metamórficas presentes na área de estudo a partir das curvas de reflectância obtidas em campo e em laboratório, empregando-se o *software* ENVI 4.7. Para o estudo espectro-mineralógico proposto, as curvas espectrais obtidas em laboratório foram priorizadas já que as curvas obtidas em campo sofreram interferências atmosféricas. Apenas no caso das amostras AP3, AP4 e AP5 os espectros coletados em campo são mostrados nesta pesquisa.

3.2 – Análise mineralógica por espectrorradiometria de reflectância e DRX

3.2.1 – Amostra AP1

Esta amostra compreende um filito (Tabela 1; Figura 4A) com bandas de absorção que caracterizam espectralmente a presença de goethita, hematita, muscovita e caulinita (Figura 4B).

A goethita é caracterizada por feições de absorção diagnósticas centradas em aproximadamente 675 e 908 nm, enquanto a hematita é marcada por feições de absorção localizadas em cerca de 660 e 886 nm (Figura 4B). As feições de absorção destes dois minerais são derivadas do processo de transição eletrônica do íon ferro férrico (Fe^{3+}) (Hunt & Ashley, 1979; Pontual *et al*, 2008).

A goethita é observada nas porções oxidadas (medida espectrorradiométrica AP1 080) do filito assim como a hematita (medida espectrorradiométrica AP1 090). Na porção mais preservada do filito, goethita (medida espectrorradiométrica AP1 020) e possível mistura de goethita e hematita (medida espectrorradiométrica AP1 000) são observadas, esta última em especial, devido à feição de absorção centrada em cerca de 902 nm, um valor intermediário das feições de absorção destes minerais puros (Figura 4B).

A muscovita é caracterizada pelas feições de absorção localizadas em 1414 (vibração do íon OH⁻) e pelas bandas de absorção centradas em ~2208, 2349 e 2438 nm, sendo a primeira a mais intensa (vibração da ligação Al-OH, medidas espectrorradiométricas AP1 080 e 090 da Figura 4B) (Hunt & Ashley, 1979; Pontual *et al*, 2008). A muscovita também foi identificada pela técnica de DRX a partir das reflexões “d” de 10,0 Å (Figura 5).

A caulinita é caracterizada por duas feições de absorção que ocorrem nos comprimentos de onda de 1400 e 2200 nm. Especificamente aparecem as feições em cerca de 1395 e 1414 nm, derivadas do processo de vibração da hidroxila (OH⁻), e em aproximadamente 2166 e 2208 nm, resultantes do processo de vibração da ligação Al-OH (Hunt & Ashley, 1979; Pontual *et al*, 2008) (Figura 4B). A caulinita é observada nas curvas espectrais do filito oxidado (medidas espectrorradiométricas AP1 080 e AP1 090) e também nas porções mais preservadas (medidas espectrorradiométricas AP1 000 e AP1 020), sendo que nesta última as feições são menos intensas (Figura 4 C). É notável a associação de curvas espectrais com menor albedo e suavização das feições de absorção de óxidos de ferro e caulinita nas porções mais preservadas da amostra AP1, fato provavelmente associado com a

presença de matéria orgânica. Este padrão espectral afetado pela presença de pequena quantidade de matéria orgânica já foi observado por Meneses *et al.* (2001) nos filitos carbonosos da região de Paracatu.

A identificação espectral da goethita, muscovita e da caulinita é corroborada pela análise de DRX, a partir das reflexões “d” de 4,18Å, 10Å e 7,0Å, respectivamente (Figura 5; Tabela 3). Todavia, quartzo (d = 4,24Å), microclínio (d = 4,22Å) e fluorapatita (d = 2,8Å) também foram identificados através da DRX (Figura 5; Tabela 3).

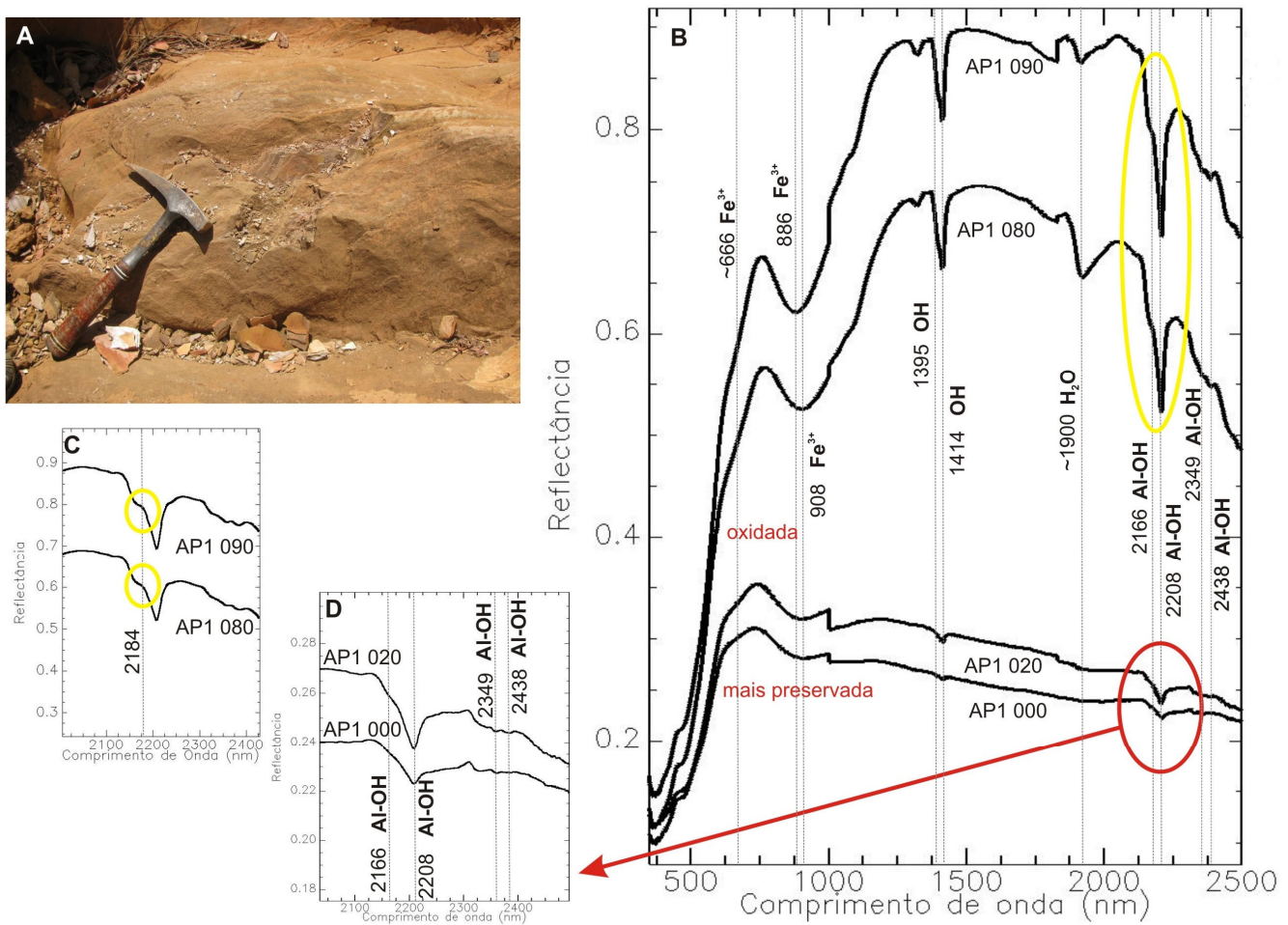


Figura 4 – A - Afloramento de filito do ponto AP1. B - Medidas espectrorradiométricas da porção oxidada (AP1 080 e AP1 090) e da porção mais preservada (AP1 000 e AP1 020). C, D – Destaque da região do infravermelho de ondas curtas, marcado pelo pico de reflectância em 2184 nm e pelas feições de absorção em ~2166 e ~2208, e em ~2349 e ~2438 nm, características da caulinita e da muscovita respectivamente.

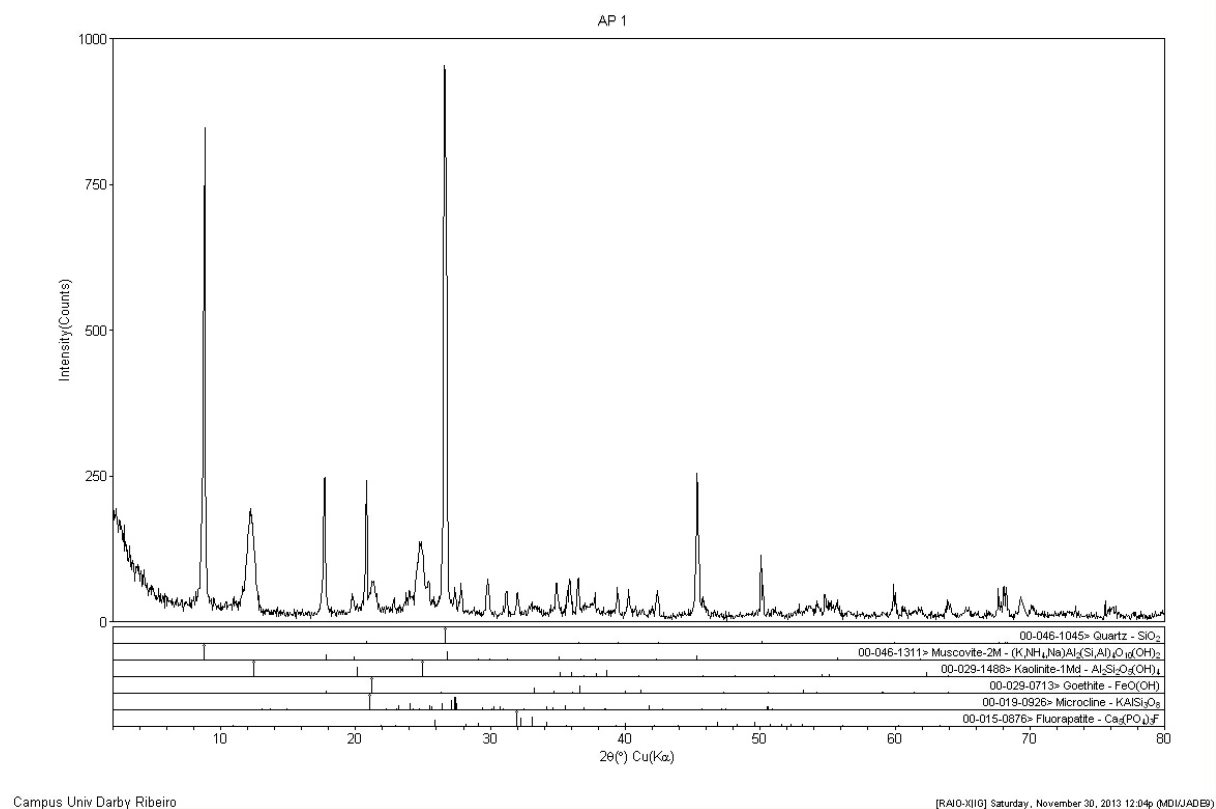


Figura 5 – Difratoograma da amostra AP1

Tabela 3 - Composição mineral das amostras determinada por DRX. M – constituinte maior, m – constituinte menor, tr – constituinte traço.

Amostras	Quartzo	Muscovita	Caulinita	Microclínio	Hematita	Goethita	Fluorapatita	Espinélio
AP1	tr	M	m	tr		tr	tr	
AP2	M	m					tr	tr
AP6	M	tr						
AP7	M	tr	m	tr				
AP8	tr	M	m	tr	tr		tr	
PT10	M	m	tr	tr				

3.2.2 – Amostra AP2

Esta amostra compreende um quartzito (Tabela 1; Figura 6A) com bandas de absorção que caracterizam espectralmente a presença de muscovita e hematita, sendo esta última, somente identificada na porção da amostra oxidada (medida espectrorradiométrica AP2 040) (Figura 6B).

A muscovita é caracterizada pelas feições de absorção localizadas em cerca de 2198, 2349 e 2438 nm, e pela técnica de DRX a partir das reflexões “d” de 10,0 Å (Figura 7).

Da mesma forma que observado na amostra AP1, a amostra AP2 também se caracteriza por curvas espectrais de menor albedo da reflectância associada com a porção mais preservada do quartzito e desenvolvimento das feições de óxido de ferro (hematita) nas partes intemperizadas (Figura 4B). Feição de água inserida em cerca de 1900 nm também é visualizada.

Uma quantidade abundante de quartzo ($d = 4,24\text{\AA}$) e traços de fluorapatita ($d = 2,8\text{\AA}$) e espinélio ($d = 2,4\text{\AA}$) foi identificada pela DRX (Figura 7) e complementam a mineralogia identificada pela espectrorradiometria de reflectância.

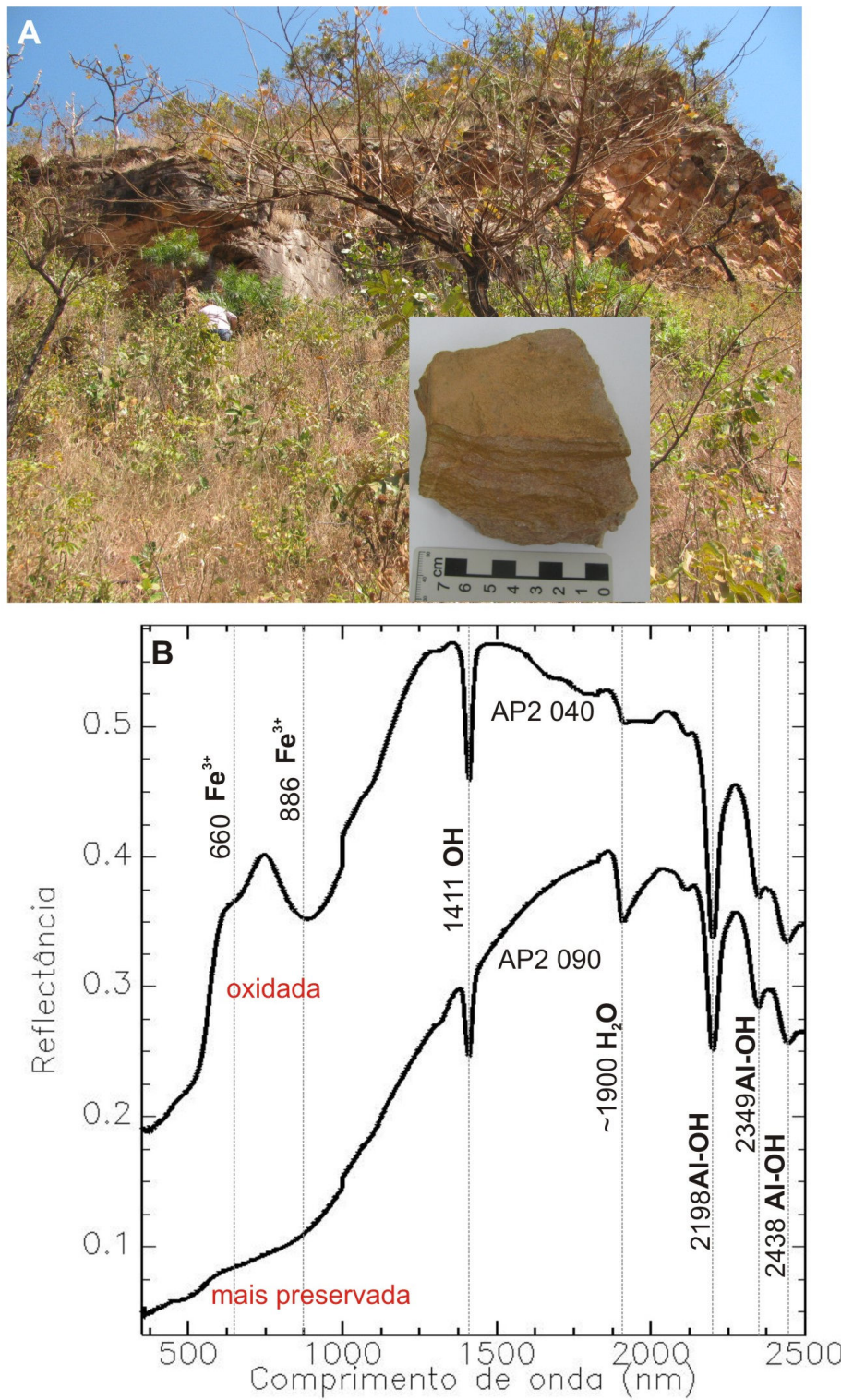
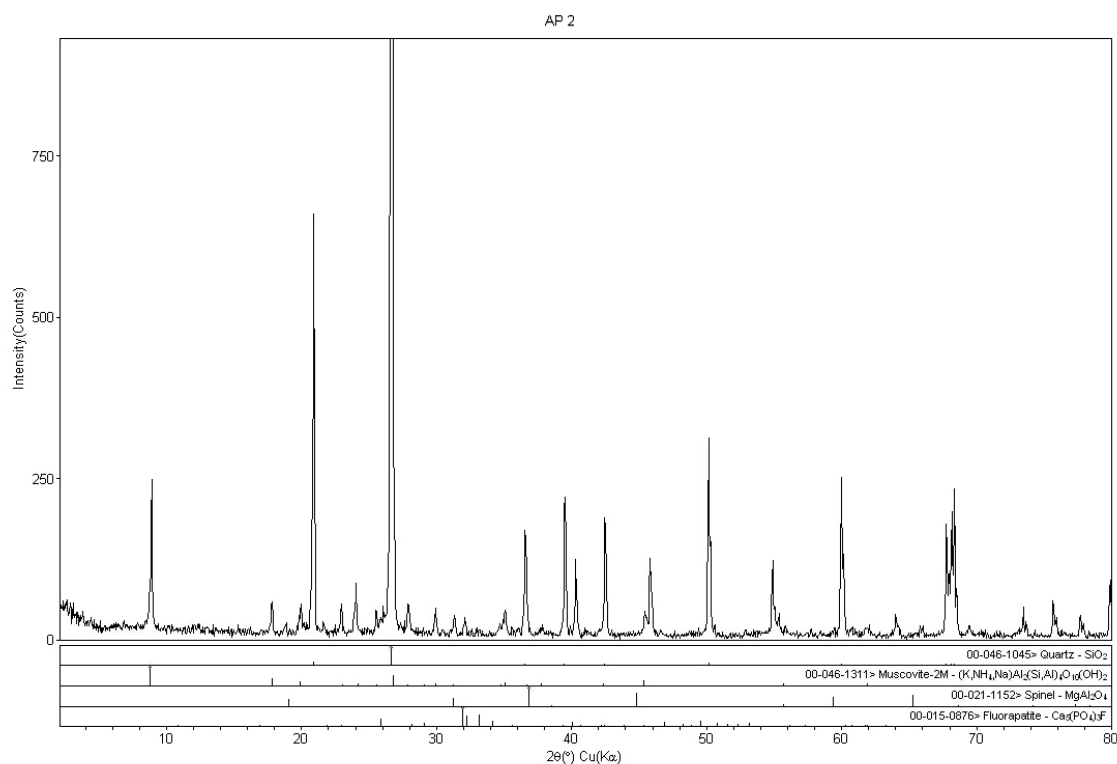


Figura 6 – **A** - Afloramento de quartzito e detalhe da amostra coletada no ponto AP2. **B** - Medidas espectrorradiométricas da porção oxidada (AP2 040) e a mais preservada (AP2 090).



Campus Univ Darby Ribeiro

[RAIO-X]G Saturday, November 30, 2013 12:07p (MDI/JADEB)

Figura 7 – Difratoograma da amostra AP2

3.2.3 – Amostra AP6

Esta amostra compreende um quartzito milonitizado (Tabela 1; Figura 8A), cujas porções mais preservadas e oxidadas apresentam muscovita (feições de absorção em aproximadamente 1411, 2200, 2349 e 2446 nm), além de uma feição localizada em 1924 nm, que pode representar presença de água em inclusão de quartzo (medidas espectrorradiométricas AP6 048 e AP6 078 da Figura 8B).

Uma quantidade abundante de quartzo ($d = 4,24\text{\AA}$) também foi verificada por análise de DRX (Tabela 3C; Figura 9).

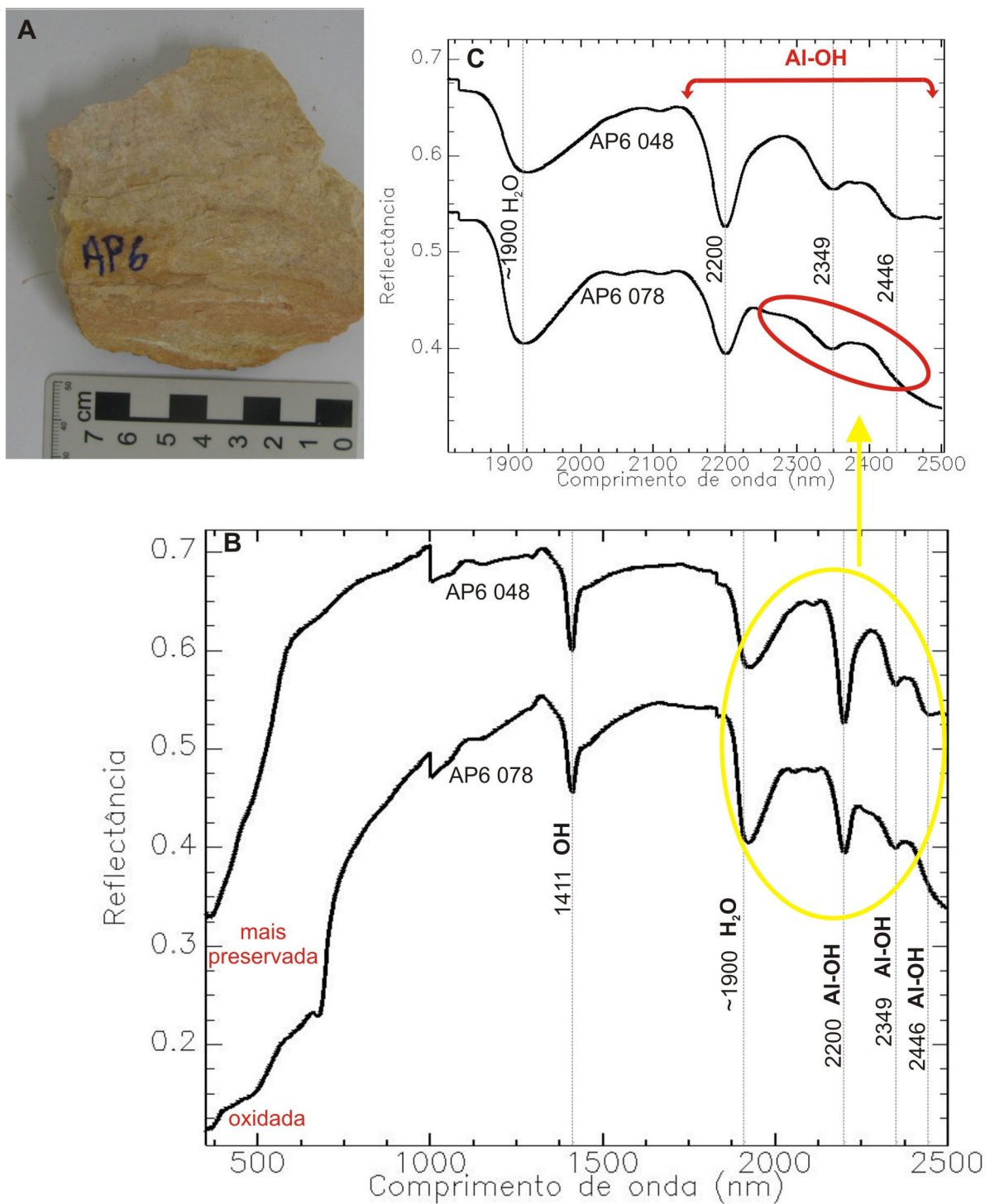
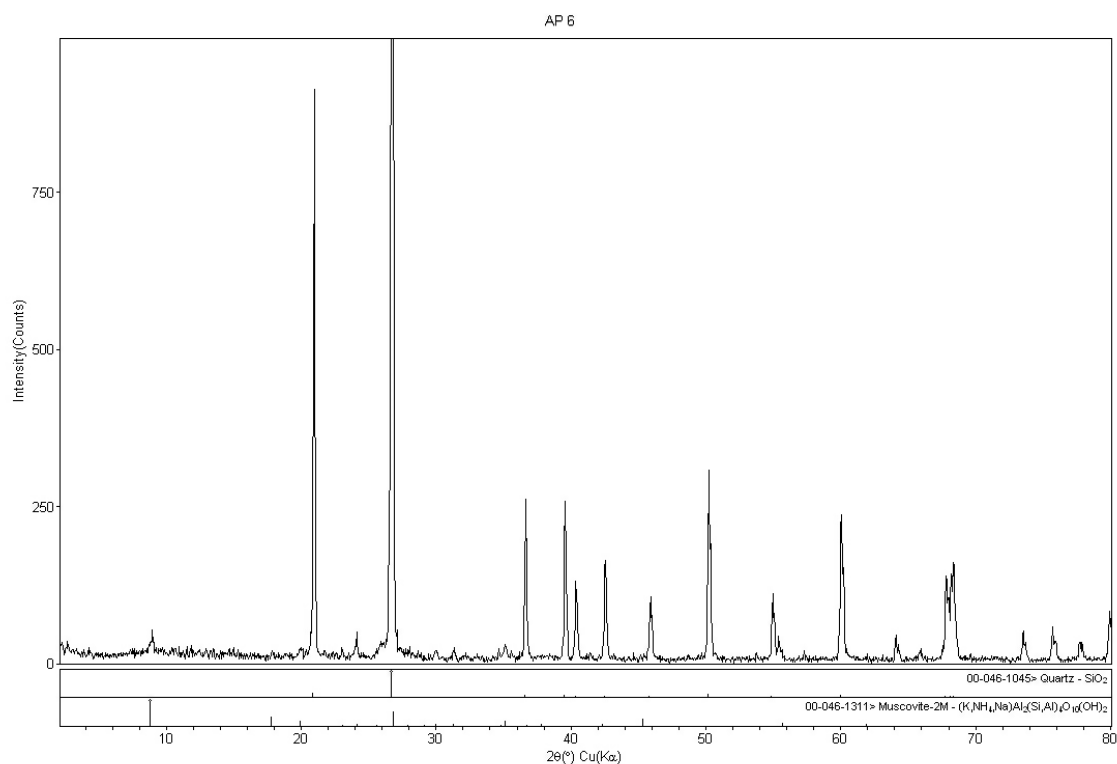


Figura 8 – **A** - Amostra de quartzito milonitizado do ponto AP6. **B** - Medidas espectrorradiométricas da porção mais preservada (AP6 048) e da oxidada (AP6 078). **C** – Destaque da região do infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas.



Campus Univ Darby Ribeiro

[RAIO-X]IG Saturday, November 30, 2013 12:07p (MDI/JADEB)

Figura 9 – Difratoograma da amostra AP6

3.2.4 – Amostra AP7

Esta amostra compreende um metarrítmito (Tabela 1; Figura 10A) com bandas de absorção que caracterizam espectralmente a presença de hematita, muscovita e caulinita.

As feições espectrais da hematita são apresentadas por intensas absorções nas porções oxidadas, estando centradas em cerca de 675 e 878 nm (medida espectrorradiométrica AP7 011 da Figura 10B), enquanto a amostra mais preservada também apresenta tais feições, porém de forma mais sutil (medida espectrorradiométrica AP7 071 da Figura 10B).

A muscovita é mais facilmente identificada na porção oxidada da amostra pelas feições de absorção localizadas em cerca de 2208, 2349 e 2438 nm. Água também é observada nas amostras por meio da feição de absorção inserida em aproximadamente 1900 nm.

A caulinita foi identificada em ambas as amostras a partir das feições de absorção em cerca de 1397 e 1414 nm e em aproximadamente em 2166 a 2208 sendo estas feições mais intensas nas porções oxidadas (medida espectrorradiométrica AP7 011 da Figura 10).

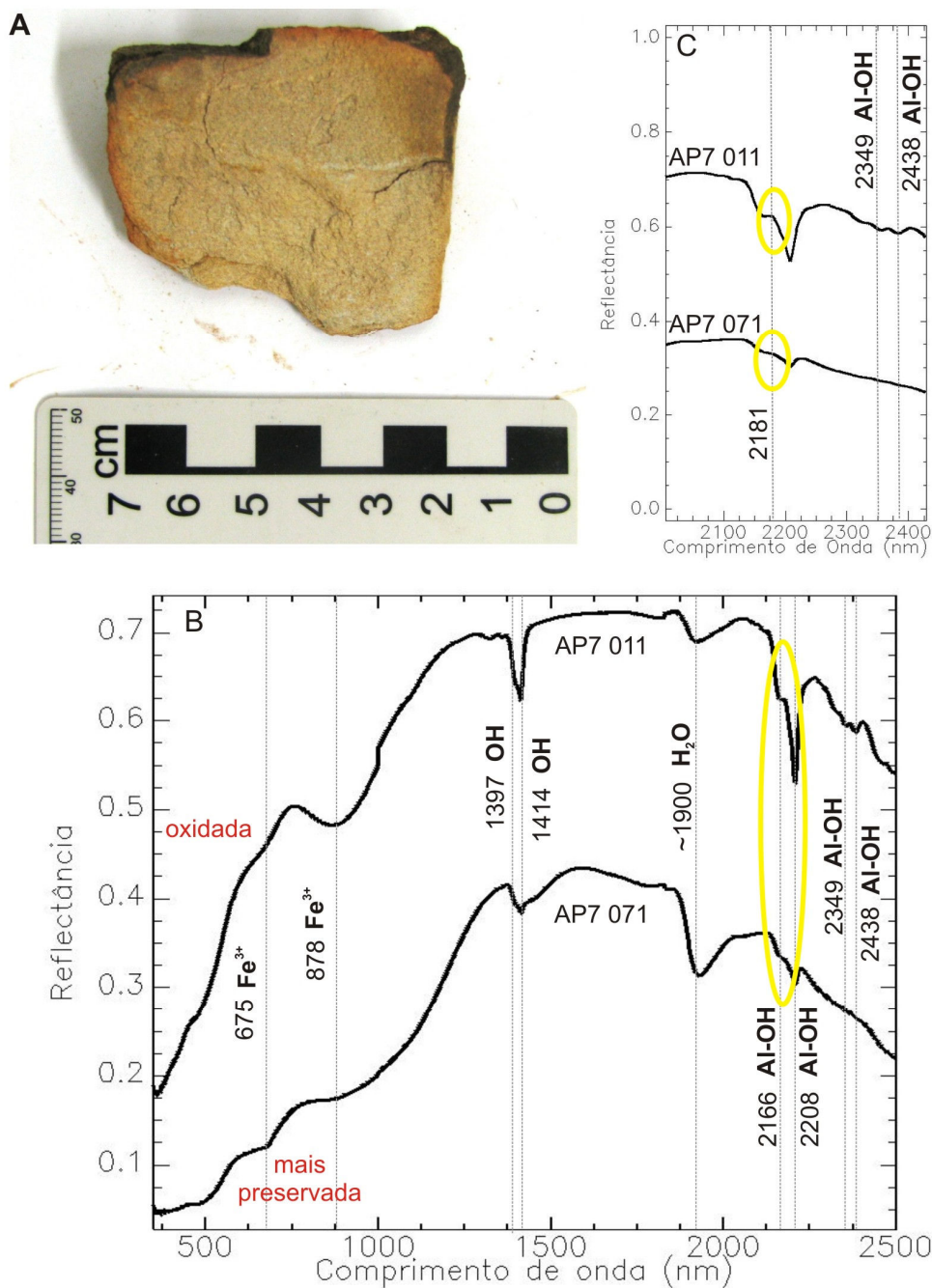


Figura 10 – **A** - Amostra de metarritmito do ponto AP7. **B** - Medidas espectrorradiométricas das porções oxidada (AP7 011) e mais preservada (AP7 071). **C** – Destaque da região do infravermelho de ondas curtas, das feições de absorção em ~2166 e ~2208 nm e do pico de reflectância em 2181 nm típicos da caulinita, e ~2349 e ~2438 nm, características da muscovita.

A identificação espectral da muscovita e da caulinita é corroborada pela análise de DRX (Tabela 3; Figura 11), a partir da reflexão “d” equivalente a 10,0 Å e 7,0Å, respectivamente. Uma quantidade expressiva de quartzo (d = 4,24Å) e traços de microclínio (d = 4,22Å) também é constatada por DRX (Tabela 3).

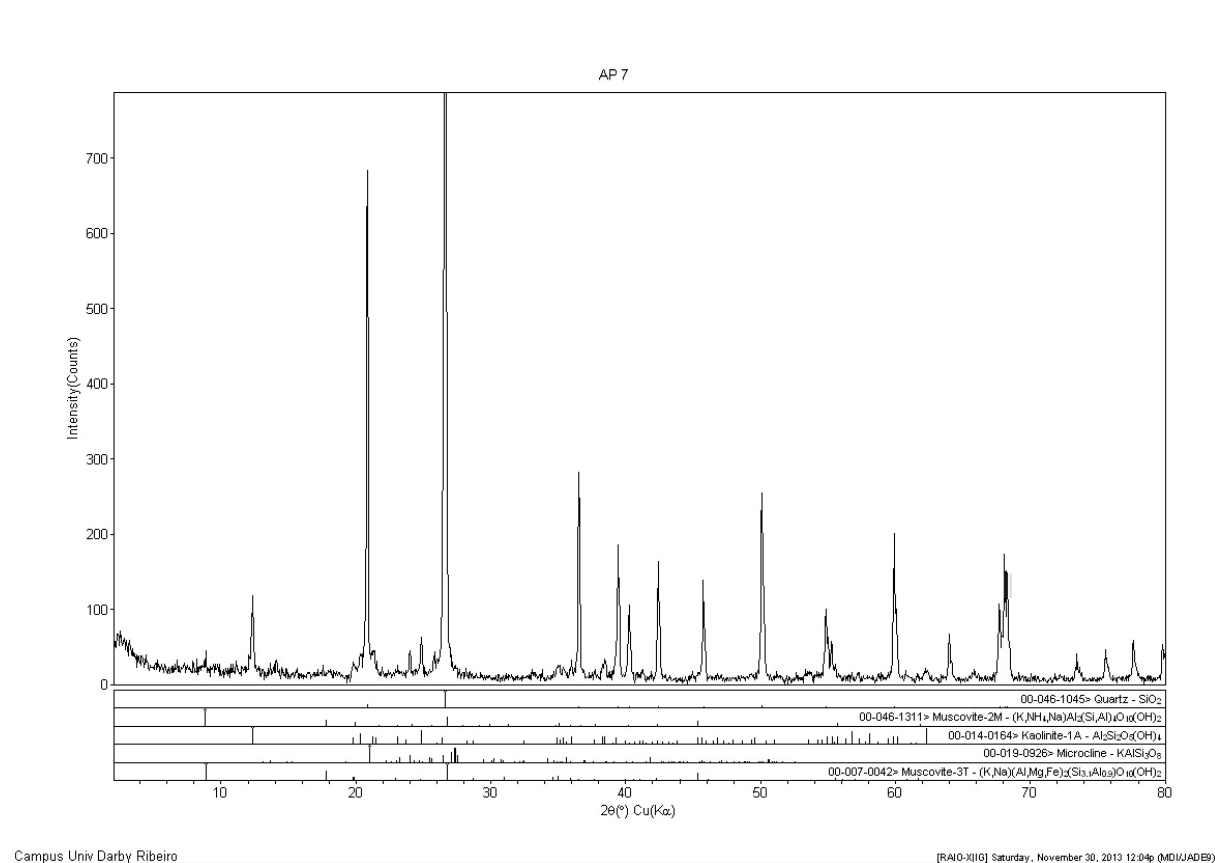


Figura 11 – Difratoograma da amostra AP7

3.2.5 – Amostra AP8

Esta amostra compreende um filito carbonoso (Tabela1; Figura 12A) com bandas de absorção que caracterizam espectralmente a presença de hematita e fengita (Figura 12B).

A hematita apresenta feições de absorção nas porções oxidada (medida espectrorradiométrica AP8 051 da Figura 12C) e mais preservada (medida espectrorradiométrica AP8 001 da Figura 12C) em aproximadamente 672 e 880 nm.

A fengita, mica rica em ferro e magnésio, também está presente nas porções mais preservadas e oxidadas, com feições de absorção similares às da muscovita, caso daquelas feições centradas em 1414, 2354 e 2449 nm, além das feições típicas da fengita, localizadas

em cerca de 2217 e 2245 nm (Figura 12D). Estas duas últimas feições são derivadas, respectivamente, do processo de vibração da ligação Al-OH e das ligações Mg-OH e Fe-OH (Scott & Yang, 1997).

A identificação espectral da hematita é corroborada pela análise de DRX, com valor da reflexão “d” equivalente 2,69Å (Tabela 3; Figura 13). Uma pequena quantidade de caulinita ($d = 7,0\text{Å}$) e traços de quartzo ($d = 4,24\text{Å}$), microclínio ($d = 4,22\text{Å}$) e fluorapatita ($d = 2,8\text{Å}$) também são verificados por DRX (Tabela 3). A muscovita foi identificada por esta técnica a partir da reflexão “d” de 10,0 Å, embora a partir da espectrorradiometria a mica reconhecida tenha sido a fengita.

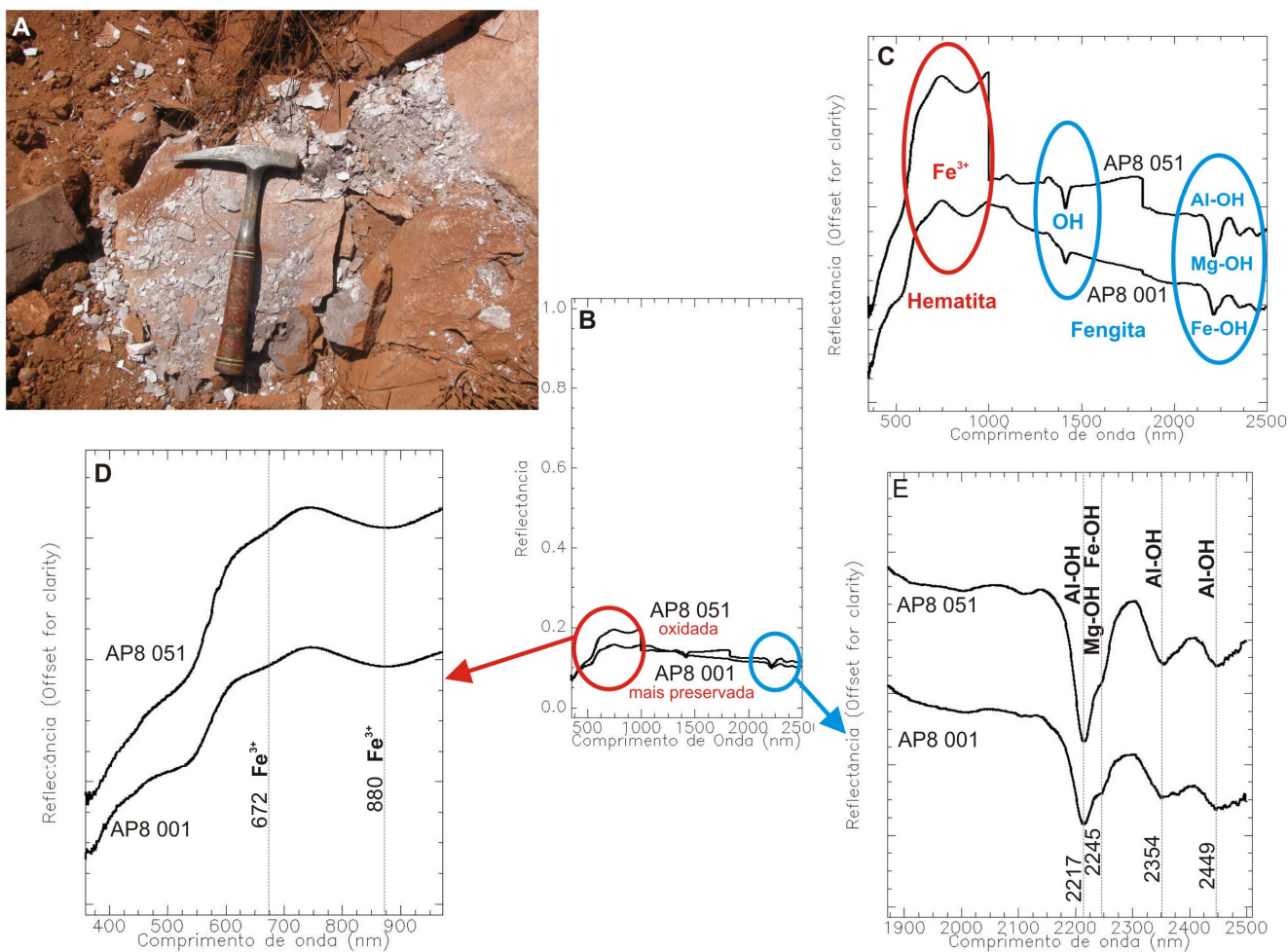


Figura 12 – A - Aspecto do filito carbonoso em afloramento, ponto AP8. B - Curvas espectrais com a reflectância variando de 0 a 1. C - Curvas espectrais representativas deste filito, considerando-se a porção oxidada (AP8 051) e a mais preservada (AP8 001). D – Destaque da região do visível ao infravermelho próximo. E – Destaque da região do infravermelho de ondas curtas.

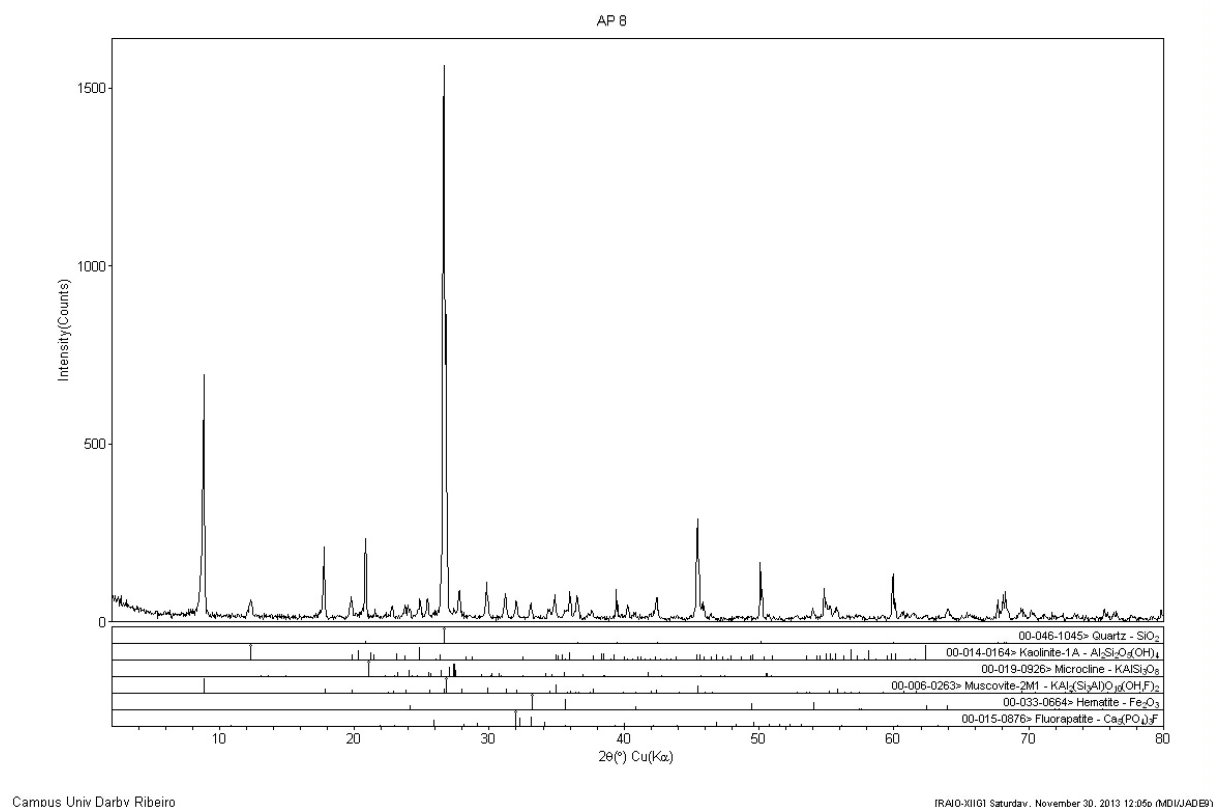


Figura 13 – Difratoograma da amostra AP8

3.2.6 – Amostra PT10

Esta amostra compreende um metapelito intercalado por quartzitos (Tabela1; Figura 14A), com bandas de absorção que caracterizam espectralmente a presença de hematita e muscovita.

A hematita foi identificada a partir das feições de absorção em aproximadamente 667 e 881 nm, e a muscovita pelas feições de absorção em cerca de 1408, 2200, 2349 e 2440 nm (medidas espectrorradiométricas PT10 021 e PT10 051 da Figura 14B).

Pela possível presença de matéria orgânica, nota-se que o albedo da curva de reflectância da porção da amostra mais preservada (amostra PT10 021) é menor em relação ao da curva espectral da porção oxidada (amostra PT10 051).

O reconhecimento espectral da muscovita e da hematita foi corroborado pela análise de DRX, respectivamente nas reflexões “d” de 10,0 Å e 2,69Å (Tabela 3; Figura 15). Uma

quantidade abundante de quartzo ($d = 4,24\text{\AA}$) e traços de caulinita ($d = 7,0\text{\AA}$) e microclínio ($d = 4,22\text{\AA}$) também é constada por DRX (Tabela 3).

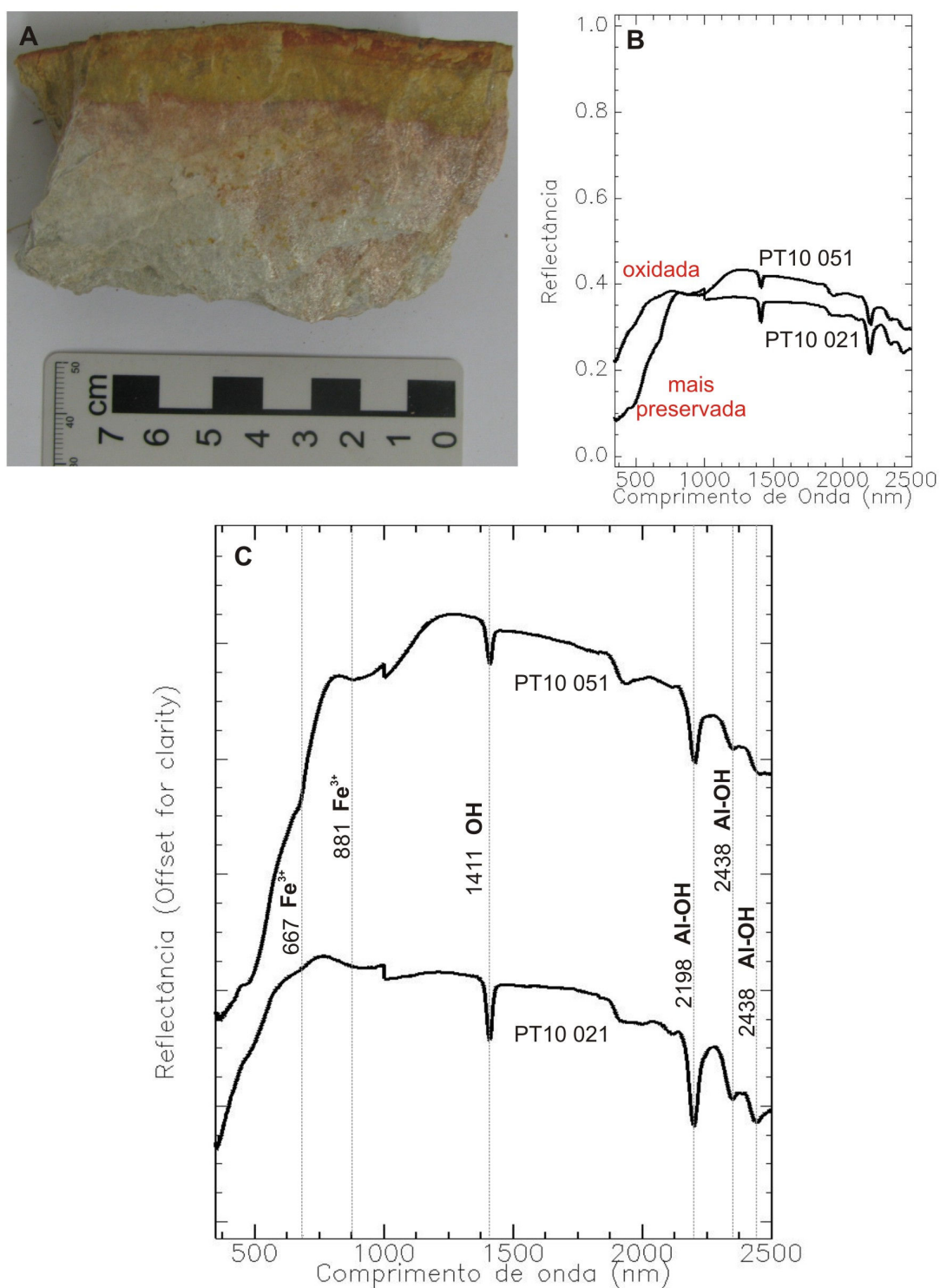


Figura 14 – A - Amostra de metapelite intercalado por quartzitos no ponto PT10. B – Curvas espectrais com a reflectância variando de 0 a 1. C - Medidas espectrorradiométricas relativas das porções mais preservada (PT10 021) e oxidada (PT10 051).

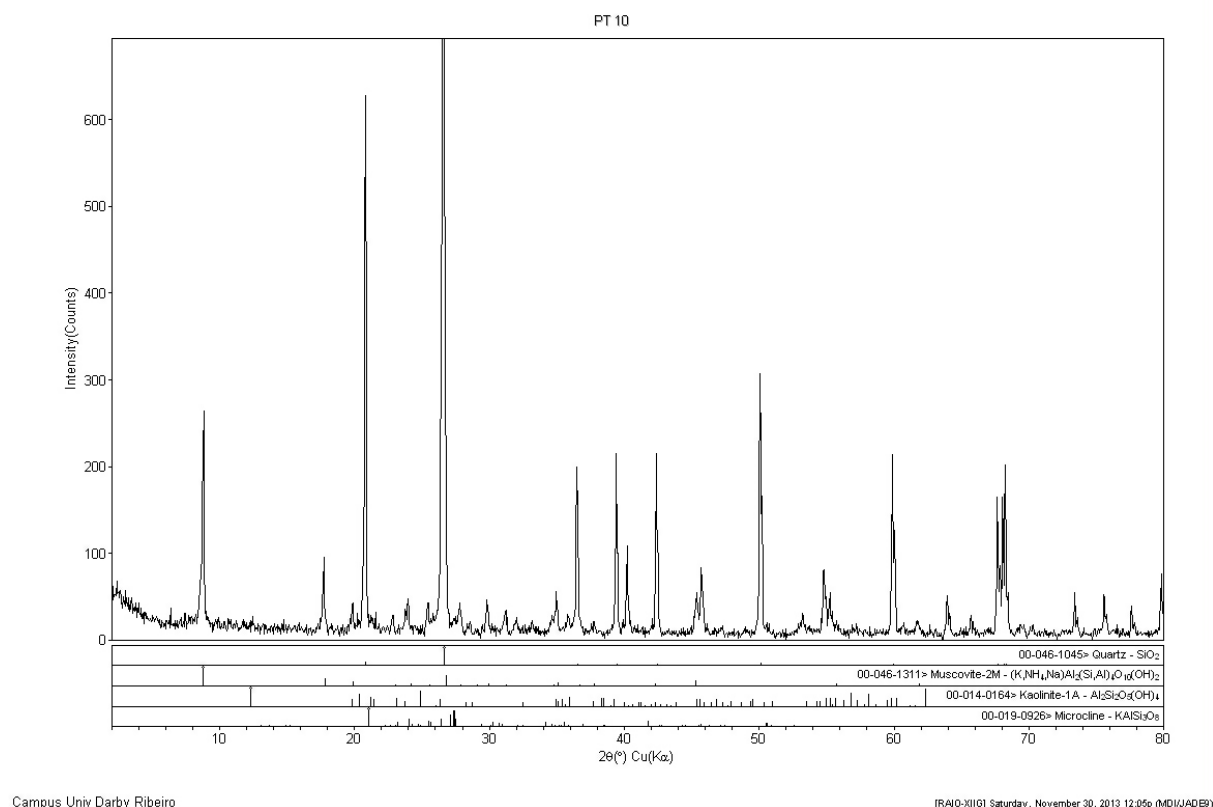


Figura 15 – Difratoograma da amostra PT10

3.2.7 – Amostras com medidas espectrorradiométricas em campo

Somente as medidas espectrorradiométricas em campo foram obtidas nos pontos AP3, AP4 e AP5, todos caracterizados por filito.

Na Figura 16A, é mostrado um aspecto geral da área onde foram feitas medições com o espectrorradiômetro *FieldSpect3 High-resolution*. Curvas espectrais representativas apresentadas na Figura 16B são caracterizadas por uma quantidade maior de ruído em relação aos espectros das outras amostras em condições de laboratório. Todavia, ainda é possível o reconhecimento de hematita (feições de absorção em ~675 e ~867 nm) e caulinita (feições de absorção em 2162 e 2208 nm nas curvas espectrais AP4 005 e AP3 006 (Figura 16C).

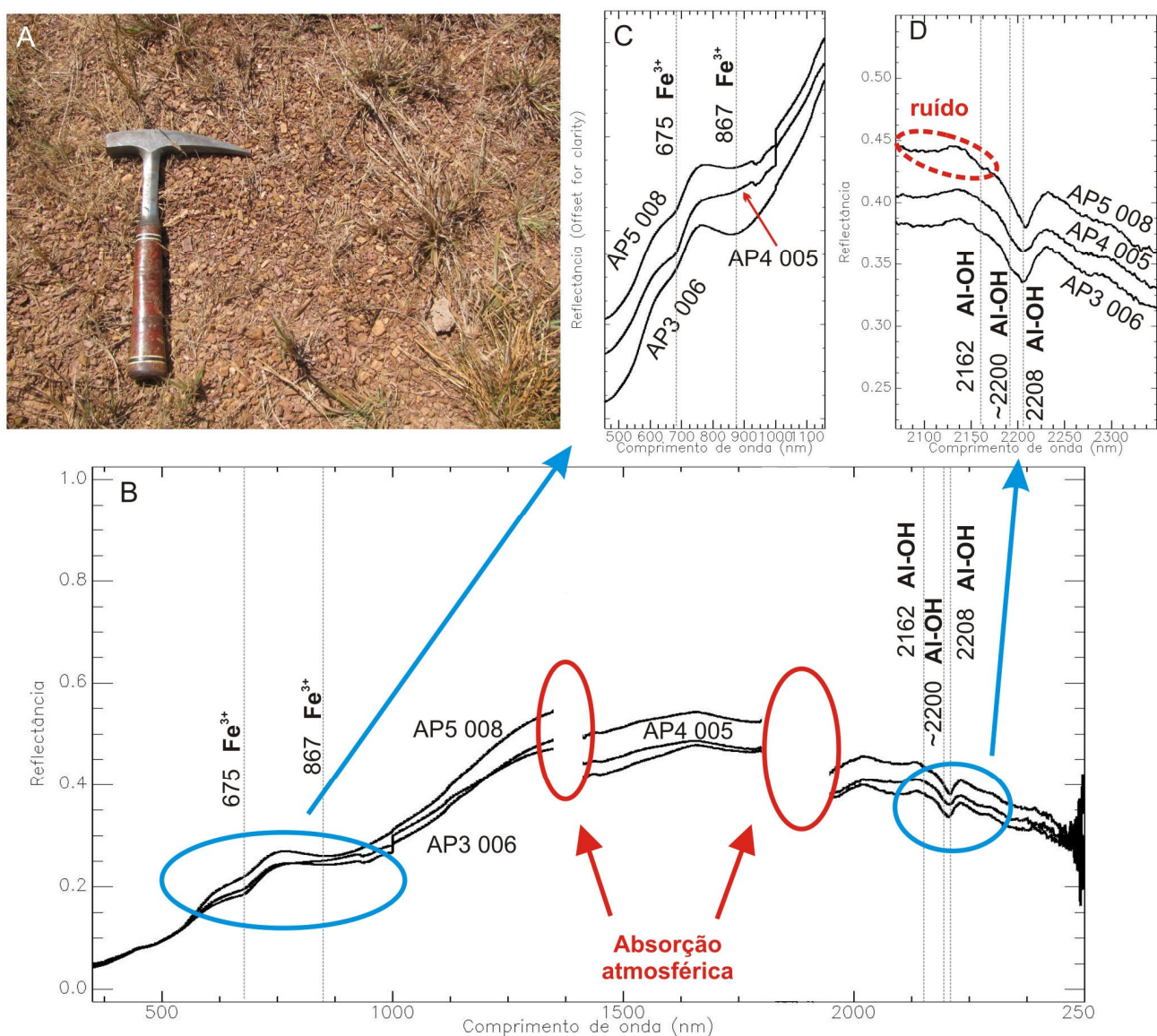


Figura 16 – **A** - Exemplo do ambiente de medições espectrais nos pontos, AP3, AP4 e AP5, caracterizado por fragmentos de filito e campo natural. **B** - Curvas espectrais representativas deste filito em cada ponto. **C** – Destaque às regiões do visível ao infravermelho próximo. **D** – Destaque à região do infravermelho de ondas curtas.

3.2.8 – Discussões

Algumas amostras de filitos e quartzitos foram caracterizadas por curvas de reflectância com albedo mais intenso nas porções oxidadas, em relação às porções mais preservadas. A possível presença de matéria orgânica tende a atenuar as feições espectrais e diminuir o albedo dos espectros de absorção. Esta relação foi averiguada nos filitos

carbonosos da região de Paracatu por Meneses *et al* (2001) que estudaram as relações entre o conteúdo de carbono orgânico total e as características na forma dos espectros coletados no intervalo do visível ao infravermelho de ondas curtas.

O intemperismo é capaz de reduzir drasticamente o conteúdo de matéria orgânica e favorecer a formação de óxidos de ferro. Neste contexto intempérico, a matéria orgânica passa a não influenciar as medidas espectrorradiométricas e, por conseguinte, o albedo das curvas de reflectância associado com medidas das porções oxidadas das amostras. Os melhores exemplos desta condição remetem às amostras de filito e filito carbonoso AP1 e AP8, respectivamente (Figuras 6; 12).

Complementarmente, no presente estudo observa-se que a espectrorradiometria permitiu caracterizar quartzitos que contém muscovita em sua composição, sendo esta mineralogia corroborada pela DRX que funcionou como outra técnica analítica adicional, sobretudo no diagnóstico de minerais formadores de rocha que não possuem feições de absorção diagnósticas na faixa do visível ao infravermelho de ondas curtas, a exemplo do quartzo e feldspato.

Em alguns casos, as análises espectrorradiométricas de filitos e quartzitos realçaram uma composição rica em hematita e fengita que não foi balizada pela DRX. Este fato justifica-se, provavelmente, pela pequena quantidade amostral de rocha cominuída utilizada na DRX (30 gramas), que pode não ter sido representativa em algumas análises.

Como forma de sintetizar a mineralogia identificada neste estudo por meio da espectrorradiometria de reflectância uma relação mineralógica está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Posição central das bandas de absorção dos alvos discriminados.

	Comprimento de onda (λ) das feições de absorção
H ₂ O	~1400, ~1900 nm
Hematita	~660, ~886 nm
Goethita	~675, ~908 nm
Caulinita	~1395, ~1414, ~2166, ~2208 nm
Muscovita	~1411, ~2198, ~2349, ~2438 nm
Fengita	~1414, ~2354, ~2449, ~2217, ~2245 nm

3.3 – Processamento de imagem ASTER

3.3.1 – Espectros de referência

Os espectros de laboratório mais representativos para os minerais hematita, goethita, muscovita, fengita e caulinita, assim como os espectros puros provenientes da biblioteca espectral do *USGS* (Clark *et al*, 1993) foram selecionados como espectros de referência (*endmembers*) para posterior uso no processamento de imagem do sensor ASTER através da técnica *Spectral Feature Fitting* (SFF). Para isto, os espectros de referência foram reamostrados à resolução espectral do sensor ASTER, conforme mostrado na Figura 17.

As curvas espectrais das amostras de rochas e da biblioteca espectral do *USGS* associadas com hematita e goethita (minerais portadores do íon ferro férrico), após a reamostragem para a resolução espectral do sensor ASTER, passam a ter comportamento espectral similar (Figura 17 A, B). Isto se deve ao fato de o sensor ASTER conter apenas três bandas na faixa do visível ao infravermelho próximo, onde a representatividade das feições de absorção para a hematita e goethita foram simplificadas ao ponto de não ser possível discriminá-las, devido a pouca quantidade de bandas nesta região do espectro eletromagnético.

Da mesma forma, as micas muscovita e fengita igualmente passaram a ter um comportamento espectral similar após o processo de reamostragem das curvas (de laboratório e do *USGS*) para a resolução espectral do sensor ASTER. As feições de absorção diagnósticas passaram a estar centradas em 2,290 e 2,336 μm (Figura 17 C; D).

A caulinita, por outro lado, após o processo de reamostragem das curvas espectrais de laboratório e do *USGS* para a resolução espectral do sensor ASTER, manteve uma discriminação espectral em relação aos demais minerais citados a partir da presença das duas feições de absorção derivadas da vibração das ligações Al-OH centradas em 2,167 e 2,290 μm (Figura 17 C; D).

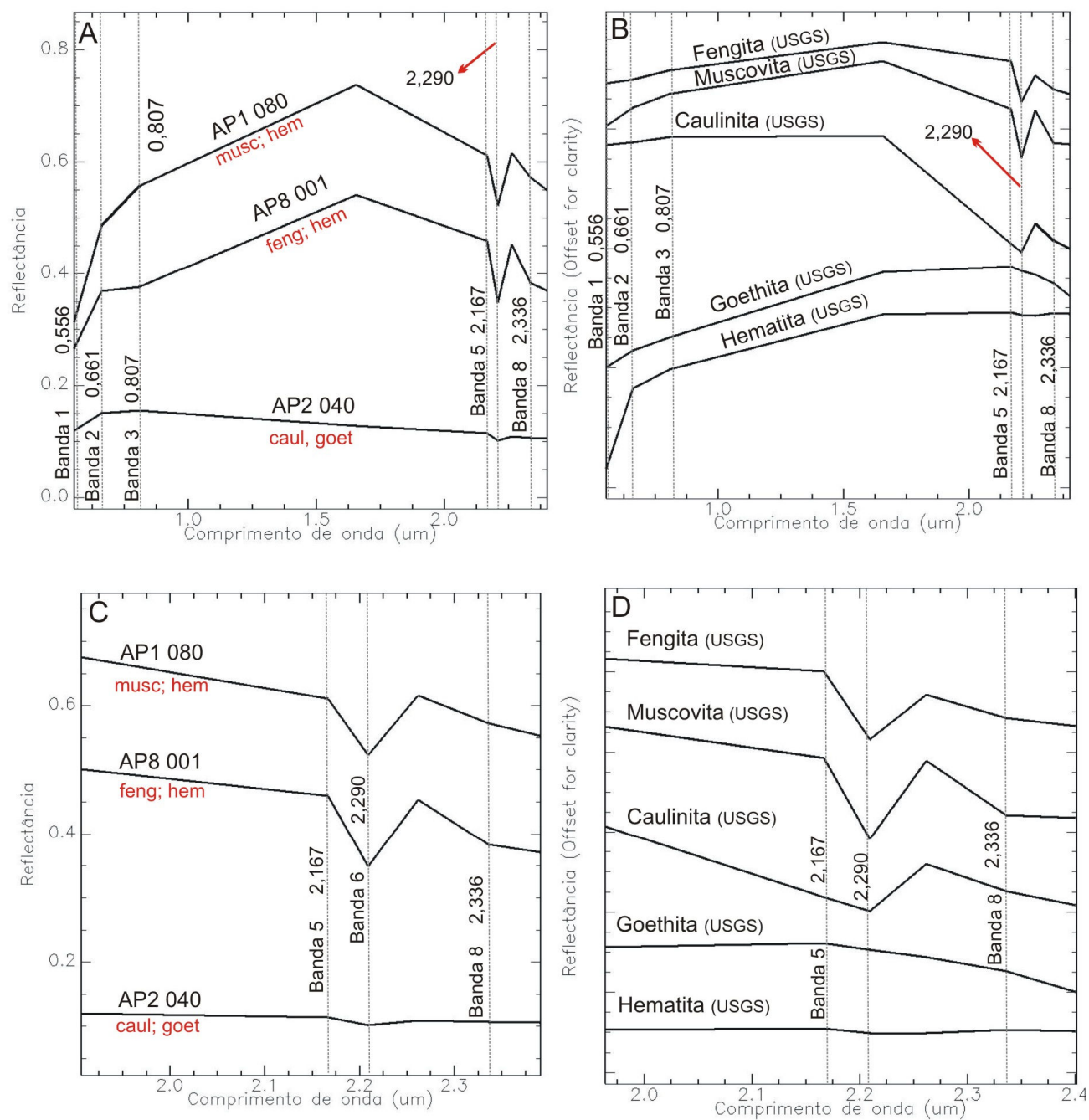


Figura 17 – **A** – Espectros de laboratório; onde AP1 080 é o espectro representativo da muscovita (musc) e hematita (hem), AP8 001 da fengita (feng) e hematita (hem) e AP2 040 da caulinita (caul) e goethita (goet); reamostrados para a resolução espectral do sensor ASTER. **B** – Espectros puros da biblioteca espectral do USGS reamostrados para resolução espectral do sensor ASTER. **C** e **D**- Destaque à região do infravermelho de ondas curtas.

3.3.2 – Aplicação do classificador SFF

Os *endmembers* selecionados ao processamento de imagem do sensor ASTER via a técnica SFF compreenderam os espectros puros do *USGS* para fengita, muscovita, caulinita, hematita e goethita, previamente reamostrados à resolução espectral deste sensor, e com a remoção do contínuo (*Hull Quotient*) a fim de normalizar as curvas espectrais para realce das feições de absorção que os discriminam.

As nove bandas do espectro refletido do sensor ASTER, previamente corrigidas aos efeitos atmosféricos, também foram processadas inicialmente para a remoção do contínuo para, em seguida, ser aplicada a classificação SFF, com a comparação dos *endmembers* com as curvas espectrais dos pixels, numa rotina pixel-a-pixel. A comparação das feições de absorção dos espectros extraídos de cada pixel com as feições de absorção dos *endmembers* é feita por meio de um algoritmo por mínimos quadrados. Desta forma, foram produzidas as imagens *Scale* (alta probabilidade do alvo mapeado) e RMS (incerteza dos resultados *Scale*) que foram usadas para a produção das respectivas imagens *FIT* (razão *Scale*/RMS).

As imagens *FIT* resultantes estão mostradas na Figura 18 para fengita (A), muscovita (B), caulinita (C), hematita (D) e goethita (E). Pixels claros denotam maior probabilidade para a cartografia destes minerais.

Observa-se que os alvos hematita e goethita, e os alvos fengita e muscovita, apresentaram um padrão idêntico de mapeamento (Figura 18 A; B; D; E). Este fato já era previsto conforme discutido no item 3.3.1 quanto ao poder de discriminação destes minerais ao analisar somente as curvas reamostradas à resolução espectral do sensor ASTER (Figura 17). Além disso, não se observa um padrão dos alvos cartografados destes quatro minerais e da caulinita quanto à ocorrência de rochas metamórficas de baixo grau, como mostrado no mapa geológico da Figura 1. Muitos alvos caracterizados por pixels claros nas imagens *FIT* (Figura 18), na verdade, estão associados à vegetação e a pivôs de irrigação em áreas agrícolas que são muito abundantes na região.

A separabilidade espectral não se mostrou eficiente nesta aplicação teste do classificador SFF para cartografia de muscovita, caulinita e fengita (associados com ocorrências de rochas metamórficas) e produtos intempéricos relacionados com óxidos de ferro.

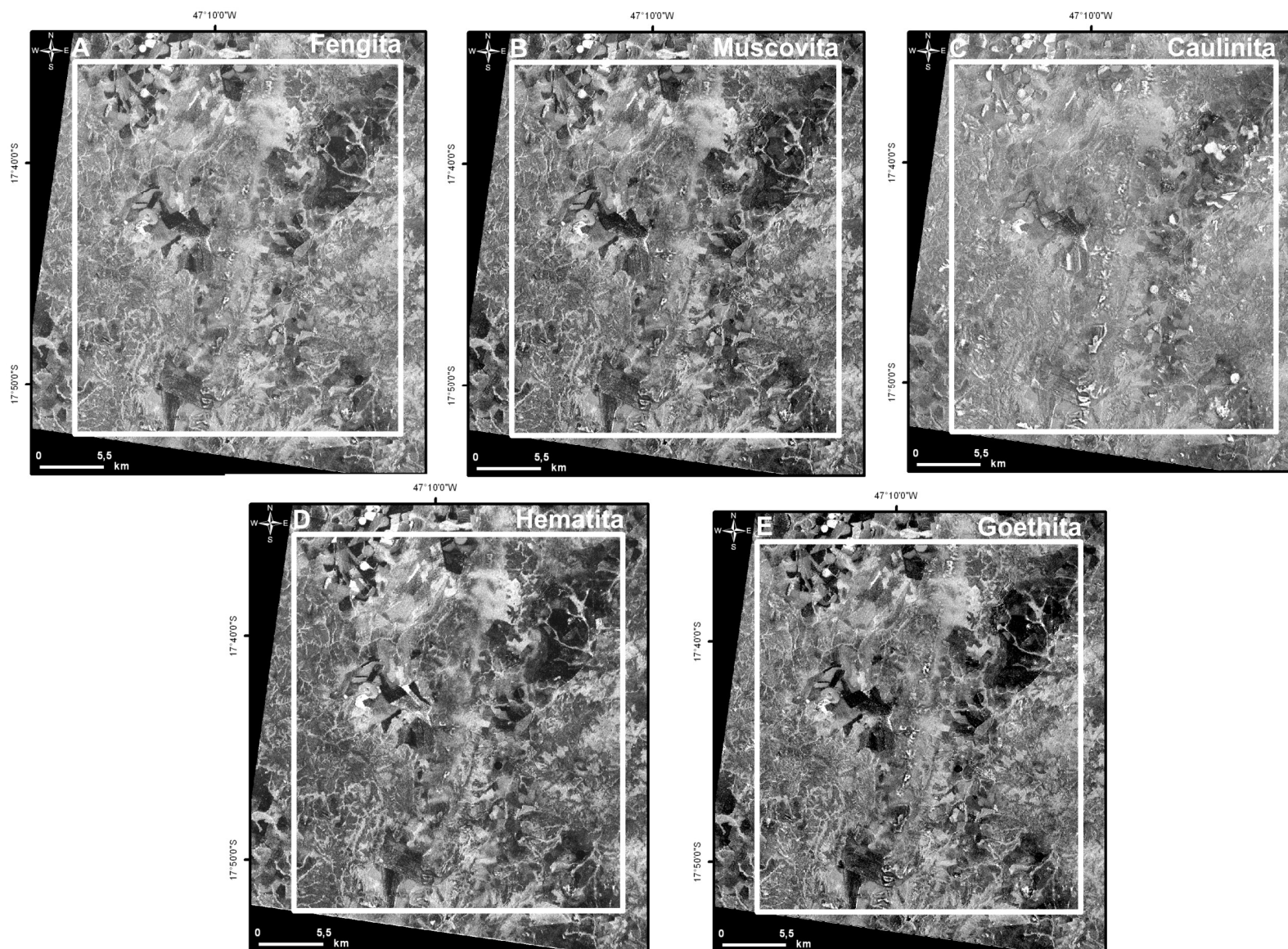


Figura 18 – Resultado da razão *Scale/RMS* (imagem *FIT*) do processamento SFF. As regiões que se concentram os pixels brancos predizem a alta probabilidade dos seguintes alvos investigados: **A** – fengita; **B** – muscovita; **C** – caulinita; **D** – hematita; **E** – goethita.

4 - Conclusão

Através da técnica de espectrorradiometria de reflectância em campo e em laboratório, corroborada pela DRX, foi objetivado identificar a mineralogia de rochas metamórficas de baixo grau da região de Guarda Mor, Minas Gerais, contemplando ainda uma tentativa de mapeamento espectral a partir do processamento digital de uma imagem do sensor ASTER.

As rochas investigadas compreenderam filito, quartzito, metarritmito e metapelito, e a identificação das respectivas curvas espectrais permitiu o reconhecimento de muscovita, fengita, caulinita e óxidos (goethita e hematita). A presença de matéria orgânica nas porções mais preservadas de algumas amostras de rochas ocasionou uma atenuação das feições de absorção dos minerais e/ou diminuição do albedo das curvas espectrais. A variação na quantidade da matéria orgânica está intrinsecamente relacionada com a declividade das curvas espectrais (Meneses *et al*, 2001), fato este observado nos espectros das amostras deste estudo, atestando a diferença de albedo das curvas espectrais das porções mais preservadas (menor albedo) em relação ao das porções oxidadas (maior albedo). A ação intempérica favorece a redução do conteúdo de matéria orgânica que passa a não mais atenuar as feições espectrais da rocha.

O método de classificação selecionado para a tentativa de mapeamento espectral de caulinita, muscovita, fengita, goethita e hematita compreendeu o *Spectral Feature Fitting* (SFF), técnica baseada na análise de materiais selecionados a partir de espectros de referência, os *endmembers*. O processo de reamostragem para a resolução espectral do sensor ASTER das curvas espectrais coletadas de amostras de rochas metamórficas e até mesmo das curvas de minerais puros, contidos na biblioteca espectral do *USGS*, diminui as chances de discriminação entre hematita e goethita, e entre as micas (fengita e muscovita), devido ao baixo conteúdo de bandas espectrais associadas à faixa do visível ao infravermelho de ondas curtas. Isto também foi verificado nas imagens classificadas em função destes *endmembers* a partir da aplicação do método SFF. Adicionalmente, estas imagens resultantes não evidenciaram claramente um padrão geológico associado com rochas metamórficas, pois foram afetados drasticamente pela presença de vegetação, áreas agrícolas e solo exposto.

Referências Bibliográficas

- ABRAMS, M. HOOK, S. RAMACHANDRAN, B. ASTER Users handbook. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer: Pasadena, Jet Propulsion Laboratory, 135 p. 2002.
- BAPTISTA, G.M.M. Processamento de Dados Hiperespectrais. In: MENESES, P.R. & ALMEIDA, T. (orgs.) Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. p. 221-238. 2012.
- BORENGASSER, M. HUNGATE, W.S. WATKINS, R. Hyperspectral remote sensing. Principles and applications. Boca Raton, FL, Taylor & Francis Group, ISBN 978-1-56670-654-4, p. 119. 2008.
- BRINDLEY, G.W. Order-Disorder in Clay Mineral Structures. In: BRINDLEY, G.W. & BROWN, G. (eds.) Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification. Mineralogical Society, monograph n.5, London, p.125-195. 1980.
- CLARK, R.N. SWAYZE, G.A. GALLAGHER, A.J. KING, T.V.V. & CALVIN, W.M. The U. S. Geological Survey, Digital Spectral Library: version 1: 0.2 to 3.0 microns, U.S. Geological Survey Open File Report 93-592. p. 1340. 1993.
- CLARK, R.N. A.J. GALLAGHER, G.A. SWAYZE. Material Absorption Band Depth Mapping of Imaging Spectrometer Data Using a Complete Band Shape Least-Squares Fit with Library Reference Spectra, Proceedings of the Second Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop. JPL Publication 90-54, 176-186. 1990.
- CROWLEY, J.K. Visible and near-infrared spectra of carbonate rocks: reflectance variations related to petrographic texture and impurities. *J. Geophys. Rés.* 91(B5):5001-5012. 1986.
- DARDENNE, M.A. The Brasília Fold Belt. In: CORDANI, U.G. MILANI, E.J. TOMAS FILHO, A. CAMPOS, D.A. (Eds.). Tectonic Evolution of South America. Proceedings of the XXXI International Geological Congress, Rio de Janeiro, p. 231–263. 2000.
- FREITAS-SILVA, F.H. Metalogênese do Depósito do Morro do Ouro, Paracatu – MG. Brasília, Tese de Doutorado – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, p. 338. 1996.
- FREITAS-SILVA, F.H. DARDENNE, M.A. Proposta de subdivisão estratigráfica formal para o Grupo Canastra no oeste de Minas Gerais e leste de Goiás. In: Simp. Geol. Centro Oeste, 4, Brasília, 1991. Anais, Brasília, SBG-DF/CO, p. 164–165. 1994.

- GRAHAM, R. HUNT & ASHLEY, R.M. Spectra of Altered Rocks in the Visible and Near Infrared. *Economic Geology*. vol. 74. p. 1613-1629. 1979.
- HUNT, G.R. & ASHLEY, R.P. Spectra of Altered Rocks in the Visible and Near Infrared. *Economic Geology*. vol. 74. p. 1613-1629. 1979.
- HUNT, G.R. & SALISBURY, J.W. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks XII. Metamorphic rocks. *Modern Geology*. vol. 5. p. 219-228. 1976 b.
- KERR, A. RAFUSE, H. SPARKES, G. HINCHEY, J. SANDERMAN, H. Visible/infrared spectroscopy (VIRS) as a research tool in economic geology: background and pilot studies from Newfoundland and Labrador. Current Research, Newfoundland and Labrador department of Natural Resources. Geological Suvery Report 11-1, 145-166. 2011.
- LOBO, F.L. Biblioteca espectral: determinação de espectros de referência para a classificação de tipos de água das áreas alagáveis da Amazônia. São José dos Campos, INPE. p. 130. 2009.
- MENESES, P.R. Princípios de sensoriamento remoto. *In: MENESSES, P.R. & ALMEIDA, T. (orgs.) Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto*. p. 1-33. 2012.
- MENESES, P.R. Fundamentos de Radiometria Óptica Espectral. *In: MENESSES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. (org.). Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais*. Brasília: Editoras UnB - Embrapa Cerrados. p. 15-40. 2001.
- MENESES, P.R. PONTARA, R.C.P FREITAS-SILVA, F.H. MADEIRA NETO, J.C. Comportamento da reflectância espectral de filitos carbonosos mineralizados em ouro. *Revista Brasileira de Geociências*. vol. 31(1). p. 83-88. 2001.
- MENESES, P.R. Avaliação e seleção de bandas do sensor Thematic Mapper do Landsat-5 para a discriminação de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí como subsídio ao mapeamento de semidetalhe. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado. p. 233. 1986.
- MOORE, D.M. & REYNOLDS, R.C. X - Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Ed. Oxford University Press. p. 332. 1989.
- NICODEMUS, F.E. RICHMOND, J.C. HSIA, J.J. GINSBERG, I.W. LIMPERIS, T. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. Washington DC: National Bureau of Standards, US Department of Commerce, p. 52. 1977.
- PONTARA, R.C.P. Análise do Comportamento Espectral do Filitos Carbonosos para interpretação de imagens. Brasília, Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, p. 133. 1998.

PONTUAL, S. MERRY, N. GAMSON, P. Spectral interpretation - Field manual. GMEX. Spectral Analysis guides for mineral exploration: AusSpec International Pty. Ltd. p. 189. 2008.

SCOTT, K.M. & YANG, K. Spectral reflectance studies of white micas. Exploration and mining report 439R. CSIRO/AMIRA Project P435. Mineral mapping with field spectroscopy for exploration. p. 35. 1997.

SWAIN, P.H. & DAVIS, S.M. Remote Sensing: the quantitative approach. 1.ed. McGraw-Hill Book Company. 1978.

TULLER, P.M. SIGNORELLI, N. BAPTISTA, M.C. BRITO, D.C. Mapa Geológico e Carta Geológica Folha SE23-V-C-V – Guarda Mor. Escala 1:100.000. Ministério das Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Serviço Geológico do Brasil. Brasília: CPRM. 2013.